



الطاقة وسلامة البيئة

تأليف: Nikolai V. Kharchenko

ترجمة: الدكتور بسام حمود

مراجعة: المهندس نزيه يانس



المركز العربي
للتدريب والترجمة والتأليف والنشر

المنظمة العربية
للحزبية والثقافة والعلم

الطاقة

وسلامة البيئة

إهداء ٢٠٠٨

**المركز العربي للتعبير والترجمة والتأليف والنشر
الجمهورية العربية السورية**

الطاقة وسلامة البيئة

تأليف

Nikolai V. Khartchenko

ترجمة

الدكتور بسام حمود

مراجعة

المهندس نزيه يانس

2000

دمشق



Umweltschonende Energietechnik

Nikolai V. Khartchenko

Translation copyright © 2000 by Arab Centre for Arabization, Translation, Authorship & Publication (ACATAP, branch of ALECSO).

Copyright of the Original German language edition:
by Vogel Verlag und Druck GmbH & Co KG, Würzburg (Germany).
All Rights Reserved.

Published in Arabic by Agreement with the original publisher Vogel
Verlag und Druck GmbH & Co KG, Würzburg.

الطاقة وسلامة البيئة

ترجمة: د. بسام حمود

المركز العربي للتعبير والترجمة والتأليف والنشر بدمشق

ص.ب: 3752 — دمشق — الجمهورية العربية السورية

هاتف: 3330998 — فاكس: 963 11 3334876 +

E-mail: acatap@net.sy

Web Site: www.acatap.htmlplanet.com

جميع حقوق النشر والطبع محفوظة

مقدمة المؤلف

يجب أن تحقق تقانة الطاقة الحديثة ثلاثة معايير: الكفاءة العالية لعملية تحويل الطاقة والاقتصادية إضافة إلى تقبّل البيئة لنتائجها. وكلما ارتفع مردود آلة حرارية قلّ تدفق الوقود لوحدة الاستطاعة، ومن ثمّ قلّ انبعاث المواد الضارة من محطة توليد الطاقة لكل واحدة من الطاقة الكهربائية المستجرة. يمكن الحد من مشكلة تخفيض ما ينطلق من ثاني أكسيد الكربون في منشآت الطاقة إما بالاستعاضة عن أنواع الوقود بأنواع أخرى أو برفع المردود.

من أجل الوصول إلى مردود أعلى عند تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية مع تخفيض انبعاثات المواد الضارة في نفس الوقت، يجب استخدام تقانات تحويل متطورة ومواد ذات مواصفات عالية عند إنتاج عناصر (مكونات) محطة توليد الطاقة التي تتعرض للإجهادات الحرارية (مولد البخار والعنفة البخارية في محطة توليد الطاقة البخارية، حجرة الاحتراق والعنفة الغازية في منشآت الطاقة الغازية)، وهذا مرتبط بتكاليف إضافية باهظة. تسمح الحرقات الحديثة ومعدات الاحتراق بالإضافة إلى حشرات الاحتراق بتخفيض إطلاق المواد الغازية الضارة الملوثة للبيئة بشكل كبير.

يعالج هذا الكتاب تقانات الطاقة سواء التقليدية أو البديلة، كذلك يعطي القارئ فكرة عن معدات الطاقة التي لا تزال قيد التطوير والتي ستحدد تقانة الطاقة في القرن الحادي والعشرين، وهذا ينطبق بخاصة على محطات الدارات المركبة (المشتركة). لقد استخدمت في القرن العشرين المحطات البخارية لتوليد الطاقة الكهربائية من حوامل الطاقة الأحفورية (المستحاثية) والنووية. ومنذ الآن بدأ التحول في محطات الطاقة التي تقام حديثاً إلى محطات الدارة المركبة ذات العنفات الغازية والبخارية بالاعتماد على العنفات الغازية العالية الكفاءة من الأجيال الجديدة. كما يُدعّم هذا المنحى بشدة ويوسّع مجال استخدام المنشآت المركبة ليشمل المنشآت التي تستخدم خلايا الوقود ومولدات MHD، وهكذا يتم الوصول إلى قيم للمردود تصل حتى 60 %.

أما وقود الفحم "غير النظيف" فيمكن بواسطة تحويله إلى غاز أن يصبح وقوداً نظيفاً. وسيتيم التعرض كذلك إلى عمليات التحويل إلى غاز وإلى إدخال آلات التحويل إلى غاز في محطات الدارة المركبة ذات العنفات الغازية والبخارية. تتألف محطات الدارة المركبة من العناصر المألوفة في العنفات الغازية والبخارية معاً. ولكي يتم تحقيق مردود أعظمي تستخدم أعلى قيم (بارامترات) لوسيط العمل (غازات الاحتراق، بخار الماء) في الجزء الموافق لكل من منشأة العنف الغازية والبخارية. أما مولد MHD فيحتاج إلى درجات حرارة أعلى (حتى 2700 K). ولا يمكن استخدام هذه التقانات بنجاح إلا عن طريق رفع قدرة المواد اللازم تطويرها على تحمل درجات الحرارة العالية.

يعالج هذا الكتاب كل الجوانب الفيزيائية والفنية لتقانة الطاقة التي تحافظ على البيئة، كما تمت مناقشة الوضع الراهن لمرحلة التطور بالإضافة إلى المشاكل الواجب حلها عند تطوير التقانات الحديثة وتم ربط ذلك بالجوانب الاقتصادية.

بالإضافة إلى الأساليب المألوفة في هندسة الطاقة، والطرائق المطورة حديثاً والتي تعتمد على استخدام الوقود الأحفوري، فقد عولج في هذا الكتاب استخدام مصادر الطاقة الجديدة في توليد الكهرباء بالإضافة إلى أساليب الوفر والحد من الهدر كأحد مصادر الطاقة. إن هذه التقانات البديلة أكثر رفقا بالبيئة من محطات توليد الطاقة المألوفة، ولكن تكاليفها العالية تجعل استخدامها حتى الآن وللأسف محدوداً. وتحقيق نضج فني مترافق مع تخفيض التكاليف، فإنما ستلاقي في المستقبل استخداماً أوسع.

لدى معالجة التقانات المختلفة تم استعراض المبادئ الأساسية في هندسة الحرارة والجريان، كما تم وصف عمليات التركيب والتصميم المتبعة في مختلف الحالات. وهناك عدد كبير من الأمثلة التي توضح كيفية التخطيط لمحطات توليد الطاقة. أما القيم المميزة والمؤشرات (البارامترات) الترموديناميكية فهي معطاة على شكل جداول أو مخططات في الملحق.

يتوجه هذا الكتاب قبل كل شيء إلى الطلاب والمهندسين المهتمين بتقانات الطاقة المتقدمة، كذلك يمكن استخدامه ككتاب تدريسي في مواد مختلفة مثل هندسة الطاقة وهندسة طرائق معالجة المواد وهندسة البيئة.

نيكولاي خارتشينكو

برلين

المحتويات

5	مقدمة المؤلف
13	1. هندسة الطاقة — مبادئ في الترموديناميك والجريانات
13	1.1 الطاقة والاستطاعة
15	2.1 القوانين الأساسية في الترموديناميك
21	3.1 دورة كارنو
25	4.1 الجريان والحنق
27	5.1 انتقال الحرارة في المعدات الحرارية
27	1.5.1 التوصيل الحراري
30	2.5.1 انتقال الحرارة بالحمل
35	3.5.1 انتقال الحرارة بالإشعاع
38	4.5.1 المبادلات الحرارية
44	6.1 أسس هندسة الجريان
49	2. الوقود والاحتراق
49	1.2 التركيب والقيمة الحرارية
54	2.2 حساب الاحتراق
54	1.2.2 العلاقات الستوكومترية (النظرية)
55	2.2.2 الهواء اللازم للاحتراق
57	3.2.2 كمية غازات الاحتراق الناتجة
66	3.2 درجة حرارة الاحتراق
68	4.2 اختبار جودة الاحتراق

70	5.2 الاحتراق ذو الإصدار القليل للغازات الضارة
73	3. المحطات البخارية
73	1.3 أنواع محطات الطاقة
76	2.3 التصميم الأساسي للمحطات البخارية (تركيبها وأجزائها)
84	3.3 استطاعة العنفة البخارية
86	4.3 تحسين مردود محطات الطاقة البخارية
86	1.4.3 رفع مؤشرات البخار الطازج وتخفيض ضغط المكثف
88	2.4.3 التخميص الوسطي
92	3.4.3 التسخين الأولي المتحدد لماء التغذية
98	4.4.3 التخميص الوسطي والتسخين الأولي المتحدد لماء التغذية
102	5.3 استطاعة الخرج والمردود الإجمالي لمحطة طاقة بخارية
106	6.3 الاستهلاك النوعي للوقود والحرارة في محطة طاقة بخارية
109	7.3 الاستهلاك الذاتي لمحطة طاقة بخارية
113	8.3 الطرائق المتطورة للاستفادة من الفحم
119	4. مولدات البخار (المراجل — الغلايات)
119	1.4 الأنواع
126	2.4 الموازنة الحرارية والمردود
131	3.4 الاحتراق والحراقات
136	4.4 مولدات البخار ذات فرشاة الوقود ذات الحركة الدوامية
136	1.4.4 أنواع فرشاة الوقود ذات الحركة الدوامية
145	2.4.4 تخفيض انبعاثات الغازات الضارة في فرشاة الوقود الدوامية
150	5.4 تصميم سطوح التسخين
150	1.5.4 الموازنة الحرارية لسطوح التسخين والاستطاعة الحرارية المنتقلة
153	2.5.4 إشعاع الغاز والشعلة في حجرة الاحتراق
155	3.5.4 انتقال الحرارة على سطوح التسخين الخارجية والداخلية

4.5.4	انتقال الحرارة من فرشاة الوقود الدوامية إلى سطوح التسخين	158
5.5.4	تحديد السطوح الحرارية اللازمة	161
6.5.4	دراسة (تصميم) مسخن الهواء الأولي المتجدد	165
5.	العنفات البخارية، المكثفات، مستنخات الماء الأولية، وحدات ماء التبريد	171
1.5	عنفات أوليلر والمعادلة الأساسية	171
2.5	أنواع العنفات البخارية	174
3.5	تصميم المكثفات والمستنخات الأولية لماء التغذية	177
4.5	وحدات مياه التبريد	186
6.	تخفيض إطلاق محطات الطاقة لغازات الاحتراق الضارة	193
1.6	إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2	193
2.6	سحب الغبار	197
3.6	سحب الكبريت	201
1.3.6	سحب الكبريت من غازات الاحتراق مع إنتاج الجبس	202
2.3.6	سحب الكبريت من غازات الاحتراق مع إنتاج الكبريت	204
4.6	سحب النتروجين (الآزوت)	206
1.4.6	منشأة سحب الآزوت (DENOX) من غازات الاحتراق	209
5.6	السحب المتزامن للكبريت والآزوت	213
7.	محطات العنفات الغازية	217
1.7	دورة عمل حول	217
2.7	الكفاءة (الفعالية)	224
3.7	رفع الاستطاعة الجاهزة	227
1.3.7	رفع نسبة الضغط ودرجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية	227
2.3.7	التسخين الأولي المتجدد للهواء	230
3.3.7	التبريد الوسطي والتسخين الوسطي	236
4.7	أجزاء المحطة	239

1.4.7	مجموعة العنف (العنف الغازية + المولدة الكهربائية)	239
2.4.7	حجرة الاحتراق والحرق اللذان يصدران قدرًا ضئيلاً من	
241	الغازات الضارة	
5.7	مقارنة بين محطات الطاقة ذات العنفات الغازية والمحطات البخارية	249
8.	محطات الدارة المركبة	249
1.8	المحطة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار	249
2.8	محطة الدارة المركبة مع إحراق وقود إضافي لتوليد البخار	258
3.8	التولائم مع استخدام الفحم الذي تم تحويله إلى غاز (المُغَوَّر)	263
1.3.8	تحويل الفحم إلى غاز (التغويز)	263
2.3.8	جهاز التحويل إلى غاز (التغويز)	265
3.3.8	محطات الدارة المركبة مع استعمال الغاز الناتج عن	
270	تحويل الكربون إلى غاز	
9.	محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة	275
1.9	الأرقام المميزة لمحطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة	275
2.9	محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الضغط المقابل	
278	وحدات سحب البخار وتكييفه	
3.9	تصميم محطة التدفئة وتوليد الكهرباء	282
4.9	مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية	289
1.4.9	مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية التي تستخدم محركات	
289	الاحتراق الداخلي	
2.4.9	كفاءة (فعالية) محركات الاحتراق الداخلي في مجموعات التدفئة	
292	وتوليد الكهرباء	
3.4.9	للموازنة الحرارية واستهلاك الوقود لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء	298
5.9	محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة التي تستخدم العنفات الغازية	300
6.9	وغير الطاقة واقتصادية استخدام منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء	304

10.	المنشآت الشمسية الحرارية والكهروضوئية (الفوتوفولطية)	309
1.10.	الإشعاع الشمسي، المجمعات الشمسية، للعلات الشمسية الحرارية	309
2.10.	المنشآت الحرارية الشمسية لتوليد الكهرباء	318
3.10.	المنشآت الكهروضوئية Photovoltaics	332
1.3.10.	الخلايا الشمسية، الجملة الشمسية والمولد الشمسي	332
2.3.10.	المنحني المميز والمردود لجملة شمسية كهروضوئية	337
3.3.10.	بنية وعناصر الوحدات الكهربائية الضوئية (PV-Systems)	343
4.3.10.	تصميم المنشأة الضوئية الكهربائية (PV)	347
5.3.10.	الاستخدام والاعتبارات الاقتصادية	349
11.	الطاقة المائية، طاقة الرياح، طاقة باطن الأرض الحرارية، الكتلة الحيوية	355
1.11.	محطات التوليد الكهرومائية	355
2.11.	محطات توليد الكهرباء باستخدام طاقة الرياح (محطات الرياح)	361
3.11.	طاقة باطن الأرض الحرارية (الجيوحرارية)	370
4.11.	طاقة الأمواج والمد والجزر	372
5.11.	استخدام طاقة الكتلة الحيوية	373
12.	تخزين الطاقة	377
1.12.	طرائق تخزين الطاقة ومعايير تقويمها	377
2.12.	خزانات الطاقة الميكانيكية والكهربائية	379
1.2.12.	التخزين بالحدافة، أحواض التخزين بالضخ،	
	التخزين بالهواء المضغوط	379
2.2.12.	تخزين الطاقة الكهركيميائي	383
3.12.	تخزين الطاقة الحرارية	385
4.12.	خزانات البخار	396
13.	استخدام الطاقة بشكل اقتصادي وفعال	399
1.13.	الحفاظة على مصادر الطاقة والبيئة	399

400	2.13 تحسين العزل الحراري في الأبنية والأنابيب
407	3.13 أجهزة التدفئة الاقتصادية
410	4.13 استرجاع الحرارة والمضخات الحرارية
414	5.13 توليد الكهرباء في آلات تمدد الغاز
	14. الهيدروجين، خلايا الوقود، المولدات الكهربائية، مولدات
419	(MHD)، مفاعل الاندماج النووي
419	1.14 إنتاج الهيدروجين واستخدامه كطاقة
423	2.14 خلايا الوقود
427	1.2.14 أنواع خلايا الوقود
430	2.2.14 فكرة ومفهوم محطة الطاقة ذات خلايا الوقود
432	3.14 تحويل الطاقة الحراري — الكهربائي
435	4.14 مولّد MHD (المولّد الهيدروديناميكي المغناطيسي)
439	5.14 الاندماج الحراري النووي المضبوط
445	الملاحق
459	تعريف الرموز
465	تثبيت المراجع
467	ملحق أبجدي بالمصطلحات الفنية

1 هندسة الطاقة - مبادئ في الترموديناميك

والجريانات

1.1 الطاقة والاستطاعة

أشكال الطاقة

! الطاقة هي القدرة على إنجاز عمل.

تظهر الطاقة في أشكال مختلفة مثل الطاقة الحركية E_k أو الكامنة E_p أو الداخلية U ، أو على شكل حرارة Q أو عمل ميكانيكي W أو طاقة كهربائية E_e ، أو طاقة ارتباط الذرات E أو طاقة التفاعلات الكيميائية $\Delta E_R \dots$ إلخ.

يمكن التعبير عن العمل الميكانيكي بالعلاقة التالية:

$$(1.1) \quad W = F \cdot s \text{ [J]}$$

حيث: F القوة مقدرة بالنيوتن [N]

s طول المسار في اتجاه تأثير القوة مقدراً بالمتر [m].

يستخدم الجول واحدة أساسية لقياس الطاقة و $1J = 1N \cdot 1m$. كما يمكن قياس الطاقة بالكيلواط الساعي. أما التحويلات بين J و kWh فهي: $1 MJ = 0.278 kWh$ و $1 kWh = 3.6 MJ$.

من أجل الكميات الكبيرة من الطاقة تستخدم الواحدات التالية:

$$J = 10^{15} \text{ (Pentajoule)} \quad 1PJ \text{ بنتاجول} \quad 1EJ \text{ (Exajoule)} = 10^{18} J \quad 1EJ \text{ إكسا جول}$$

$$1GJ \text{ (Gegajoule)} = 10^9 J \quad 1GJ \text{ جيجا جول} \quad 1TJ \text{ (Terajoule)} = 10^{12} J \quad 1TJ \text{ تيرا جول}$$

$$1kJ \text{ (Kilojoule)} = 10^3 J \quad 1kJ \text{ كيلو جول} \quad 1MJ \text{ (Megajoule)} = 10^6 J \quad 1MJ \text{ ميغا جول}$$

وتستخدم أحياناً واحدة تدعى واحدة الفحم المكافئ (TCE) حيث $1TCE = 29308 MJ$ وكذلك واحدة تدعى واحدة النفط المكافئ (TOE) حيث $1TOE = 41868 MJ$.

الطاقة الحركية هي:

$$(2.1) \quad E_k = \frac{1}{2} m w^2 \quad [J]$$

حيث: m الكتلة بالـ [kg]

w السرعة [m/s].

أما الطاقة الكامنة فهي ترتبط بالموقع وتحسب من العلاقة:

$$(3.1) \quad E_p = g m H \quad [J]$$

حيث: g التسارع الأرضي [m^2/s]

H الارتفاع عن مستو مرجعي [m].

عند استخراج الطاقة أو تحويلها أو استخدامها يمكن التمييز بين مصادر الطاقة التقليدية أو البديلة وكذلك بين كل من الطاقة المفيدة الأولية أو الثانوية أو النهائية أو المفيدة. من مصادر الطاقة التقليدية هناك أنواع الوقود الأحفوري (المستحاثي) مثل الفحم، التورف (فحم المستنقعات)، الخشب، الغاز الطبيعي والنفط. وهناك أنواع من الوقود تنتج صناعياً مثل غاز الفحم، الغاز المُمِيع، فحم الكوك، هذا بالإضافة إلى النفايات القابلة للحرق. أما مصادر الطاقة المتجددة أو البديلة (غير التقليدية) فهي الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، طاقة المياه، الطاقة الحرارية لجوف الأرض وطاقة الكتلة الحيوية. الطاقة الأولية هي طاقة منبع الطاقة دون تحويل، مثل الطاقة الشمسية والطاقة الكيميائية للوقود المستحاثي، أما الطاقة الثانوية فهي الطاقة بعد تحويلها إلى شكل آخر مثل التيار الكهربائي، القوة، الطاقة الحرارية، وهي تحسب بالاستعانة بمردود منشأة أو جهاز تحويل الطاقة (محطة الطاقة، محرك الاحتراق، مرجل التسخين). الطاقة النهائية هي الطاقة المتاحة للمستهلك، وتساوي الطاقة الثانوية مطروحاً منها ضياعات الطاقة بفعل النقل والتوزيع. الطاقة المفيدة هي الطاقة التي تستخدم لغرض معين مفيد.

الجدول 1.1: الطاقة والاستهلاك والمدة التي تكفي من أجلها أنواع الوقود المستحاثي في العالم

الوقود	الاحتياطي بمليارات الأطنان من الفحم المكافئ	الاستهلاك بمليارات الأطنان من الفحم المكافئ	المدة التي يكفي لها بالأعوام
الفحم	1031.6	4.6	224
النفط	197.6	4.4	45
الغاز الطبيعي	196.6	2.6	65

إن احتياطي العالم من حوامل الطاقة ذات المصدر المستحاثي محدود، وبين الجدول (1.1) معطيات عن احتياطات الطاقة المؤكدة وكذلك الاستهلاك والمدة التي يكفي لها كل من الفحم والنفط والغاز الطبيعي.

الاستطاعة

هي الطاقة في واحدة الزمن

$$(4.1) \quad P = W / t \quad [W]$$

واحدة الاستطاعة هي الواط و 1 W يساوي 1 J/s. كذلك تستعمل وحدات أخرى للاستطاعة من مضاعفات الواط هي: 1kW = 10³ W ، 1MW = 10⁶ W ، 1GW = 10⁹ W.

2.1 القوانين الأساسية في الترموديناميك

القانون الأول في الترموديناميك

تجري عمليات تحويل الطاقة في جمل (منظومات) ترموديناميكية مغلقة أو مفتوحة، وينص القانون الأول في الترموديناميك على أنه من أجل جملة ترموديناميكية مغلقة يتحقق ما يلي:

$$(5.1) \quad \begin{aligned} \delta q &= \delta u + \delta w \quad [J/kg] \\ Q &= \Delta U + W \quad [J] \end{aligned}$$

حيث: Q كمية الطاقة الحرارية المقدمة إلى الجملة أو المطروحة منها

ΔU تغير الطاقة الداخلية للحملة

W العمل الناتج عن تغير الحجم.

ويقبل في كثير من الأحيان، عند إجراء تحليل ترموديناميكي بأن وسيط العمل يتصرف كما لو أنه غاز مثالي. ويمكن اعتبار معظم الغازات عند ضغوط معتدلة ودرجات حرارة عالية بمثابة غازات مثالية، أي عبارة عن وسيط ذي جزيئات كتلة ولكن ليس لها حجم، ولا توجد بينها قوى تجاذب. يبد أن هذا النموذج (أي الغازات الكاملة) لا ينطبق على بخار الماء ووسائط العمل البخارية. يمكن حساب تغير الطاقة الداخلية لغاز مثالي من العلاقة:

$$(6.1) \quad \begin{aligned} \delta u &= C_v \delta T \quad [J/kg] \\ \Delta U &= m C_v (T_2 - T_1) \quad [J] \end{aligned}$$

حيث: C_p السعة الحرارية بثبوت الحجم [J/kg K]

T درجة الحرارة [K]، والمليان 1 و2 يشيران إلى الحالة الأولى والنهائية على التوالي.
من أجل الحرارة المضافة أو المطروحة يمكن كتابة المعادلة التالية بالشكل التفاضلي:

$$(7.1) \quad \delta Q = m T \delta s \text{ [J]} \quad \text{أو} \quad \delta q = T \delta s \text{ [J/kg]}$$

وبطريقة مماثلة فإن العمل الناتج عن تغير الحجم:

$$(8.1) \quad \delta W = m dv = p \delta V \text{ [J]} \quad \text{أو} \quad \delta w = p \delta v \text{ [J/kg]}$$

حيث: m الكتلة [kg].

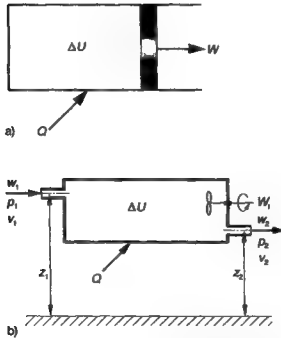
T درجة الحرارة [K].

s الانتروبي النوعي لوسيط العمل [J/kg K].

p الضغط [Pa].

v الحجم النوعي لوسيط العمل [m³/kg].

V حجم وسيط العمل [m³].



الشكل 1.1 : (a) جملة ترموديناميكية مغلقة (b) جملة مفتوحة.

بمعاملة المعادلتين (7.1) و(8.1) تنتج الحرارة Q والعمل W من أجل عملية ترموديناميكية، وهما تابعان لتغيرات حالة وسيط العمل. لحساب الحرارة المضافة أو المطروحة في عملية ايزوبارية (ثابتة الضغط) وباستخدام غاز مثالي يمكن مثلاً كتابة:

$$(9.1) \quad Q = m C_p (T_2 - T_1) \quad [J]$$

حيث: C_p السعة الحرارية للغاز بثبوت الضغط $[J/kg \text{ K}]$. الدليلان 1 و2 يشيران إلى حالة الجملة في البداية والنهاية.

يمكن بطريقة مماثلة أيضاً حساب العمل في العملية الايزوبارية (بثبوت الضغط):

$$(10.1) \quad W = m p (v_2 - v_1) = p (V_2 - V_1) \quad [J]$$

ينص القانون الأول في الترموديناميك من أجل جملة ترموديناميكية مفتوحة (كما في الشكل b.1.1) يمر عبرها وسيط عمل، على ما يلي:

$$(11.1) \quad Q = \Delta H + \Delta E_k + \Delta E_p + W_t \quad [J]$$

حيث: Q الحرارة المضافة أو المطروحة.

ΔE_p , ΔE_k تغير الطاقة الحركية والكامنة للوسيط العامل

W_t العمل المحرك (يختلف عن العمل الذي يسببه تغير الحجم $p dv$).

بالتعويض عن كل حد بقيمته في المعادلة (11.1) نجد:

$$(12.1) \quad Q = \Delta H + m (w_2^2 - w_1^2)/2 + m g (z_2 - z_1) + W_t \quad [J]$$

حيث: m الكتلة $[kg]$.

w سرعة الجريان $[m/s]$.

g التسارع الأرضي $[m/s^2]$.

z موقع المقطع بالنسبة لمسكن مرجع، الدليلان 1 و2 يشيران إلى مقطعي الدخول والخروج.

أما تغير الإنتالي لغاز مثالي فهو:

$$(13.1) \quad \Delta H = H_2 - H_1 = m C_p (T_2 - T_1) \quad [J]$$

1.1 مثال

ما هي قيمة العمل الناتج عن تغير الحجم، تغير الطاقة الداخلية، تغير الانتالبي لـ 12 kg هواء عندما تُضاف كمية 3.618 MJ حرارة بثبوت الضغط الذي قيمته 5 bar.

* المترجم .

السعة الحرارية بثبوت الضغط للهواء تبلغ $1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ ، ثابت الغاز للهواء $R = 0.287 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$.

الحل:

1. تغير درجة الحرارة

$$\Delta T = T_2 - T_1 = Q / m c_p$$

$$= 3618 \text{ kJ} / 12 \text{ kg} \times 1.005 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} = 300 \text{ K}$$

2. العمل الناتج عن تغير الحجم

$$W = p (V_2 - V_1) = m R (T_2 - T_1)$$

$$= 12 \text{ kg} \times 0.287 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C} = 1033.2 \text{ kJ}$$

3. تغير الطاقة الداخلية للهواء: حسب القانون الأول في الترموديناميك

$$\Delta U = Q - W$$

$$= 3618 \text{ kJ} - 1033.2 \text{ kJ} = 2584.8 \text{ kJ}$$

4. في التحول الايزوباري يكون تغير الإنتالبي للهواء مساوياً للطاقة المضافة:

$$\Delta H = Q = 3618 \text{ kJ}$$

وبحسب العمل الميكانيكي بشكل تفاضلي كما يلي:

$$\delta w_i = -v \delta p \text{ in J/kg}$$

$$\delta W_i = -m \delta w_i = -V \delta p \quad [\text{J}] \quad \text{أو:} \quad (14.1)$$

بمكاملة المعادلة (14.1) ينتج العمل المحرك لعملية ترموديناميكية. فمثلاً من أجل تمدد

ايزونتروبي لغاز مثالي ضمن عنققة غازية يمكن أن نكتب:

$$W_i = k (p_1 V_1 - p_2 V_2) / (k - 1) \quad [\text{J}] \quad (15.1)$$

حيث: k أس الايزونتري (يساوي 1.4 من أجل الهواء).

القانون الأول في الترموديناميك من أجل دورات العمل

يتم في الآلات الحرارية تحويل الحرارة إلى عمل، ومن هذه الآلات العنفات الغازية والبخارية ومحركات الاحتراق. يجري تحليل عمليات الطاقة في هذا الآلات بناءً على القوانين الأساسية للترموديناميك. وتعمل الآلة الحرارية عادة وفق دورة عمل محددة. يتم في جزء من دورة العمل إضافة الحرارة (Q_2) من مصدر حراري ذي درجة حرارة عالية إلى وسيط العمل (مثلاً بخار الماء،

غازات الاحتراق) ويتحول جزء من الحرارة المضافة إلى عمل مفيد، أما الباقي (Q_R) فيطرح إلى الوسط الخارجي (ماء التبريد، الهواء الخارجي) ويقع بمجال درجات الحرارة بين T_{\min} و T_{\max} . فمثلاً تتألف دورة عنقة غازية من انضغاط أدياباتي (كظيم) وإضافة للحرارة بثبوت الضغط ثم تمدد كظيم وأخيراً طرح للحرارة بثبوت الضغط.

يكون تغير الطاقة الداخلية لوسيط العمل من أجل دورة عمل معدوماً، ولذلك ينص القانون الأول في الترموديناميك من أجل دورة عمل على ما يلي:

$$(16.1) \quad W_u = Q_u$$

حيث العمل المفيد:

$$(17.1) \quad W_u = W_{\exp} - W_{\text{comp}}$$

والحرارة المفيدة:

$$(18.1) \quad Q_u = Q_s - Q_R$$

حيث: W_{\exp} عمل التمدد، W_{comp} عمل الانضغاط،

Q_s الحرارة المضافة، Q_R الحرارة المطروحة.

المرودد الحراري لدورة عمل معينة هو نسبة العمل المفيد إلى الحرارة المضافة:

$$(19.1) \quad \eta_{th} = W_u / Q_s$$

القانون الثاني في الترموديناميك

ينص القانون الثاني:

على أن الإنتروبي S لجملة كظيمة مغلقة لا يمكن أن يتناقص أبداً، حيث يبقى ثابتاً في العمليات العكوسة، ويزداد في العمليات غير العكوسة:

$$(20.1) \quad \Delta S_{ad} \geq 0$$

وبحسب القانون الثاني في الترموديناميك فإن جزءاً فقط من الحرارة المضافة يتحول إلى عمل مفيد.

تكون الطاقة المكتسبة من أجل جملة ما أعظمية إذا أوصلت الجملة إلى حالة مماثلة للوسط الخارجي بعملية عكوسة.

يمكن وصف قدرة جملة على تقديم العمل عن طريق ما يسمى بـ "الإكسرجي" وهو يساوي العمل المحرك الأعظمي الذي تستطيع جملة معينة أن تقدمه عند شروط محيطية محددة .

تتألف الطاقة الحرارية من الإكسرجي E_o والطاقة الضائعة أثناء عملية تحويل الطاقة B_o :

$$Q = E_o + B_o \quad [J] \quad (21.1)$$

يمكن حساب الإكسرجي من العلاقة:

$$E_o = Q (1 - T_{amb} / T) \quad (22.1)$$

حيث: T درجة حرارة الجملة، T_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط $[K]$.

ويمكن تحويل الإكسرجي فقط إلى عمل، ولا يمكن للطاقة الحرارية للوسط المحيط أن تقوم بإنجاز أي عمل.

تكتب الطاقة النوعية المنسوبة إلى 1 kg من الوسيط العامل كمايلي:

$$e = h - T_{amb} \cdot s \quad [J/kg] \quad (23.1)$$

حيث h الانتالبي النوعي، s الانتروبي النوعي

T_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط.

يُعطى الضياع في العمل المحرك النوعي عند إجراء تغير غير عكوس في الحالة لجملة بالمقارنة مع شروط محيطية معينة كما يلي:

$$w_{iL} = \Delta e = h_1 - h_2 - T_{amb} (s_1 - s_2) \quad [kJ/kg] \quad (24.1)$$

ومردود الإكسرجي لعملية ما هو كما يلي:

$$\eta_{ex} = 1 - E_L / E_{used} \quad (25.1)$$

حيث: E_L ضياع الإكسرجي $[J]$

E_{used} الإكسرجي المستخدم $[J]$.

يمكن حساب ضياع الإكسرجي في بعض التطبيقات العملية كمايلي:

أ - عند انتقال الحرارة من وسط درجة حرارته T_1 إلى وسط آخر درجة حرارته T_2 (عند درجة حرارة للوسط المحيط T_{amb}):

$$E_L = T_{amb} \cdot Q (T_1 - T_2) / T_1 T_2 \quad (26.1)$$

* Exergy: الإكسرجي: هو الجزء من الطاقة الذي يتحول فعلاً إلى الشكل الآخر المطلوب للطاقة (عند تحويل الطاقة من شكل إلى آخر) (المترجم).

ب - عند مزج غازين مثاليين (كتلتهما m_1 و m_2 ، ثابتا الغازين R_1 و R_2 ، الضغط الإجمالي p والضغط الجزئية p_1 و p_2):

$$(27.1) \quad E_L = T_{\text{amb}} \cdot (m_1 R_1 \ln p / p_1 + m_2 R_2 \ln p / p_2)$$

ج - بفعل انخفاض الضغط من p_1 إلى p_2 عند تعريض غاز مثالي للاختناق:

$$(28.1) \quad E_L = m R T_{\text{amb}} \ln p_1 / p_2$$

2.1 مثال

ما هي قيمة الإكسر جي النوعية لبخار الماء عند ضغط 30 bar ودرجة حرارة 500 °C إذا كانت درجة حرارة المحيط 20 °C. $T_{\text{amb}} = 20^\circ\text{C}$.

الحل:

من الجداول نجد أنه عند $p = 30 \text{ bar}$ و $T = 500^\circ\text{C}$ يكون $h = 3455 \text{ kJ/kg}$ و $s = 7.245 \text{ kJ/kg K}$ وبالتالي بالإكسر جي النوعية:

$$\begin{aligned} e &= h - T_{\text{amb}} s \\ &= 3455 \text{ kJ/kg} - 293 \text{ K} \times 7.245 \text{ kJ/kg K} = 1332.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

3.1 مثال

ما هي قيمة ضياع العمل النوعي بفعل تشتت الطاقة في مكثف عنفة بخارية عندما تكون مواصفات البخار للعنفة كما يلي: $p = 4 \text{ kPa}$ و $x = 0.87$ ؟ درجة حرارة الوسط المحيط 20 °C.

الحل:

a) عند $p = 4 \text{ kPa}$ و $x = 0.87$ لبخار الماء فإن $h_1 = 2237.5 \text{ kJ/kg}$ و $s_1 = 7.435 \text{ kJ/kg}$ وللبخار الذي تحول إلى ماء متكاثف $s_2 = 0.4225 \text{ kJ/kg K}$ و $h_2 = 121.41 \text{ kJ/kg}$.
b) ضياع العمل النوعي بفعل تشتت الطاقة:

$$\begin{aligned} W_{\text{L}} &= h_1 - h_2 - T_{\text{amb}} (s_1 - s_2) \\ &= 2237.5 - 121.41 - 293 (7.435 - 0.4225) = 61.43 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

3.1 دورة كارنو

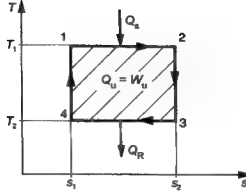
تم دورة كارنو المثالية بين درجتَي الحرارة T_1 (مصدر الحرارة) و T_2 (جهة تصريف الحرارة) بدون ضياعات حرارية وتتضمن التحولات العكوسة التالية للغاز المثالي:

(a) تمدد بثبوت درجة الحرارة 1 - 2

(b) تمدد بثبوت الايزونتروبي 2 - 3

(c) انضغاط لثبوت درجة الحرارة 3 - 4

(d) انضغاط بثبوت الايزونتروبي 4 - 1



الشكل 2.1 : دورة كارنو ذات الاتجاه نحو اليمين.

من أجل التمدد بثبوت درجة الحرارة 1 - 2 فإن:

$$(29.1) \quad T_1 = \text{const}, \quad p_1 v_1 = p_2 v_2$$

حيث: p الضغط [Pa]

v الحجم النوعي $[m^3/kg]$.

وبالنسبة للحرارة المضافة Q_s وعمل التمدد W_{12} فإنه:

$$(30.1) \quad Q_s = m \cdot T_1 (s_2 - s_1) \quad [J]$$

$$(31.1) \quad W_{12} = m R T_1 \ln (p_1 / p_2) = m R T_1 \ln (v_2 / v_1) \quad [J]$$

حيث: T درجة حرارة الغاز

s الانتروبي النوعي للغاز $[J/kg \cdot K]$

R ثابت الغاز $[J/kg \cdot K]$

p الضغط [Pa]

v الحجم النوعي للغاز $[m^3/kg]$.

الدليلان 1 و 2 يشيران إلى حالة الغاز قبل وبعد التمدد الإيزونترومي.

أما من أجل التمدد الايزونترسي 2 - 3 فنطبق على عوامل الحالة عند النقطة 2 قبل التمدد (حيث يكون الضغط p_2 ، درجة الحرارة T_1 ، الحجم النوعي v_2) وعند 3 بعد التمدد (حيث تسود p_3 ، T_2 ، v_3) العلاقات التالية:

$$(32.1) \quad p_2 v_2^k = p_3 v_3^k, T_1 v_2^{k-1} = T_2 v_3^{k-1} \text{ و } T_1 / p_2^{(k-1)/k} = T_2 / p_3^{(k-1)/k}$$

وينتج عمل التمدد W_{23} :

$$(33.1) \quad W_{23} = m c_v (T_1 - T_2) = [k / (k - 1)] m R (T_1 - T_2)$$

$$= [k / (k - 1)] (p_2 V_2 - p_3 V_3) \quad [J]$$

من أجل الانضغاط الايزونترسي 3 - 4:

$$(34.1) \quad p_3 v_3 = p_4 v_4 \text{ و } T_2 = \text{const}$$

أما الحرارة المطروحة Q_R وعمل الانضغاط W_{34} فيحسبان كما يلي:

$$(35.1) \quad Q_R = m T_2 (s_2 - s_1) \quad [J]$$

$$(36.1) \quad W_{34} = m R T_2 \ln (p_4 / p_3) = m R T_2 \ln (v_3 / v_4) \quad [J]$$

وللانضغاط الايزونترسي 1 - 4:

$$(37.1) \quad p_4 v_4^k = p_1 v_1^k, T_2 v_4^{k-1} = T_1 v_1^{k-1} \text{ و } T_2 / p_4^{(k-1)/k} = T_1 / p_1^{(k-1)/k}$$

عمل الانضغاط W_{41} :

$$(38.1) \quad W_{41} = m c_v (T_1 - T_2) = [k / (k - 1)] m R (T_1 - T_2) = [k / (k - 1)] (p_1 v_1 - p_4 v_4) \quad [J]$$

أما الحرارة المفيدة المتحوّلة فهي:

$$(39.1) \quad Q_u = Q_s - Q_R = m(T_1 - T_2) (s_2 - s_1) \quad [J]$$

عمل التمدد وعمل الانضغاط للدورة العمل:

$$(40.1) \quad W_{\text{comp}} = W_{34} + W_{41} \quad [J] \text{ و } W_{\text{exp}} = W_{12} + W_{23}$$

الفرق بين W_{comp} و W_{exp} هو العمل المفيد للدورة العمل:

$$(41.1) \quad W_u = m R (T_2 - T_1) \ln (p_1 / p_2) = m R (T_1 - T_2) \ln (v_2 / v_1) \quad [J]$$

والعمل المفيد W_u للدورة العمل مساوٍ للحرارة المفيدة Q_u .

المردود الحراري للدورة كارنو

يُعبّر عن جودة تحوّل الحرارة إلى عمل عن طريق المردود الحراري للدورة، وهو نسبة العمل المفيد W_u إلى الحرارة المضافة Q_s ، ويمكن كتابة مردود كارنو بالشكل:

(42.1)

$$\eta_{th,c} = W_u / Q_s = 1 - Q_R / Q_s = 1 - T_2 / T_1$$

تزداد قيمة $\eta_{th,c}$ بارتفاع درجة الحرارة T_1 للطاقة الحرارية المقدمة للحملة وبانخفاض درجة الحرارة T_2 لكمية الحرارة المطروحة من الحملة.

إذا: تصلح دورة كارنو كمعملية مثالية للمقارنة وذلك في الآلات الحرارية، وهي تملك المردود الحراري النظري الأقصى في مجال مُعطى لدرجات الحرارة يقع بين T_1 و T_2 .

مثال 4.1

ما هو المردود الحراري لدورة كارنو في المجال الحراري $T_1 = 1800 \text{ K}$ و $T_2 = 300 \text{ K}$

الحل:

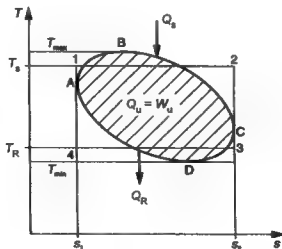
المردود الحراري لدورة كارنو

$$\eta_{th,c} = 1 - T_2 / T_1 = 1 - 300 / 1800 = 0.833$$

الاستعاضة عن دورة ما بدورة كارنو

يمكن الاستعاضة عن أية دورة تستخدم لتحويل الحرارة إلى عمل (كتلك المبينة في الشكل 3.1 على المخطط $T-s$) بدورة كارنو 1234 تحوي نفس عمليتي تغير الانتروبي ونفس عمليتي إضافة وطرح الحرارة (Q_R , Q_s). أما درجتا الحرارة الوسطيتان T_B , T_C لعملية ABCD فهي تحسب كما يلي:

$$(43.1) \quad T_R = Q_R / m \Delta S \text{ [K]}, \quad T_s = Q_s / m \Delta S$$



الشكل 3.1 : الاستعاضة عن دورة عمل ما بدورة كارنو.

إن المردود الحراري لنورة عمل ما مساوٍ للمردود الحراري لنورة كارنو من أجل الدورة .ABCD.

$$(44.1) \quad \eta_{th,ABCD} = 1 - T_R / T_S$$

بما أن T_S أخفض من T_{max} و T_R أعلى من T_{min} (درجة الحرارة الأعظمية والأصغرية للدورة ABCD) فإن $\eta_{th,ABCD}$ أدنى من المردود الحراري لدورة كارنو التي تقع بين الدرجتين T_{max} و T_{min} . من لمعادلة (44.1) ينتج المبدأ الترموديناميكي لتحسين الكسب (المردود) لأية آلة حرارية.

لزيادة المردود الحراري لآلة حرارية يجب رفع درجة الحرارة الوسطية للعملية التي تتم عندها إضافة الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية للعملية التي يتم عندها طرح الحرارة .

4.1 الجريان والخنق

الجريان عبر فوهة

تستخدم الفوهات لتسريع جريان غاز أو بخار كما هو الحال في الصناعات مثلاً. في الفوهة المدببة (المتناقصة المقطع) كما في الشكل (4.1) يحدث تمدد كظيم للغاز أو البخار. بإهمال السرعة عند الدخول V_1 يمكن حساب سرعة الخروج للغاز أو البخار كما يلي:

$$(45.1) \quad w_2 = \sqrt{2\Delta h} \quad [m/s]$$

حيث: Δh هبوط الإنتالبي في الفوهة [J/kg]

من أجل الغازات المثالية فإن $\Delta T = c_p \cdot \Delta h$ ولذلك

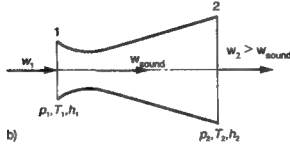
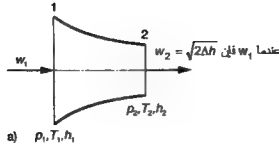
$$(46.1) \quad \begin{aligned} w_2 &= \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)} = \sqrt{2[k/(k-1)]R(T_1 - T_2)} \\ &= \sqrt{2[k/(k-1)]RT_1 \left[1 - (p_2/p_1)^{(k-1)/k}\right]} \end{aligned}$$

حيث: c_p السعة الحرارية للغاز عند ثبوت الضغط [J/kgK]

T_2, T_1 درجتا الحرارة قبل وبعد الفوهة [K]

k أسس التحول الايزونتروبي

R ثابت الغاز [J/Kg K]



الشكل 4.1 : الفوهات (a) فوهة بسيطة، (b) فوهة لافال Laval، 1 مقطع الدخول، 2 مقطع الخروج.

في فوهة لافال Laval-Nozzle المبينة في الشكل (b4.1) المولفة من جزء متناقص المقطع وجزء آخر متزايد المقطع يتم الوصول إلى سرعة تفوق سرعة الصوت. عند المقطع الأصغري للفوهة هذه وعند درجة حرارة معينة T يتم الوصول إلى سرعة الصوت:

(47.1)

$$w_{\text{sound}} = \sqrt{kRT}$$

ويجري حساب سرعة الخروج v_2 عن طريق العلاقة 45-1 أو 47-1.

مثال 5.1

يبلغ هبوط الإنتالبي في فوهة لافال لمرحلة في عنفة بخارية 180 kJ/kg، ما هي سرعة خروج البخار من هذه الفوهة؟

الحل:

$$w = \sqrt{2\Delta h} = \sqrt{2 \cdot 180 \text{ kJ/kg}} = 600 \text{ m/s} \quad \text{سرعة خروج البخار}$$

عملية الخفق

هي عملية تمدد عكوس للغاز أو البخار عن طريق مروره عبر عائق (حاجز، صمام، أنبوب متناقص المقطع) ويرافق ذلك هبوط للضغط. عند خفق الغازات المتالية يبقى كل من الانتالبي ودرجة الحرارة ثابتين أي أن:

(48.1)

$$h_1 = h_2 \text{ و } T_1 = T_2$$

عند خنق بخار الماء يبقى الانتالبي ثابتاً، أما درجة الحرارة فإنها تهبط، أي:

(49.1)

$$h_1 = h_2 \text{ و } t_2 < t_1$$

تستخدم صمامات الخنق لتخفيض ضغط وسيط ما مثل بخار الماء.

6.1 مثال

ما هي درجة الحرارة للبخار بعد صمام خنق عندما تكون مواصفاته قبل الصمام $p_1 = 2 \text{ Mpa}$,

$$t_1 = 340^\circ\text{C} \text{ وبعد الصمام } p_2 = 0.8 \text{ bar}?$$

الحل:

انتالبي البخار الذي يبقى ثابتاً بعد الخنق هو $h_1 = 3100 \text{ kJ/kg}$ (وذلك عند $p_1 = 2 \text{ MPa}$, $t_1 = 340^\circ\text{C}$). من مخطط $h-s$ للبخار ومن أجل عملية ثابتة الانتالبي وعند الضغط 0.8 bar يمكن استنتاج درجة الحرارة $t_2 = 312^\circ\text{C}$.

5.1 انتقال الحرارة في المعدات الحرارية

1.5.1 التوصيل الحراري

جدار مستوي

يتم انتقال الحرارة بشكل عام عن طريق: التوصيل، الحمل، الإشعاع. وينشأ هذا بفعل فرق درجات الحرارة في الجسم أو المائع، حيث أن الحرارة تنتقل من الموقع ذي درجة الحرارة الأعلى إلى الموقع ذي درجة الحرارة الأقل.

يُوصف تغير درجة الحرارة في حيز معين أو جسم عن طريق حقل درجة الحرارة الأحادي أو الثنائي أو الثلاثي الأبعاد، ويُعطى تغير درجة الحرارة المكافئ بدلالة "تدرج درجة الحرارة" [gradient]. يكون هناك حقل درجة حرارة مستقر عندما تكون درجة الحرارة غير مرتبطة بالزمن.

عند انتقال الحرارة بالتوصيل تحدث حركة انتقالية للحزيمات في الغازات والسوائل واهتزاز حواجز ودوران للذرات في الأجسام الصلبة. في المعادن تشارك الإلكترونات في توصيل الحرارة.

يُحسب التيار (التدفق) الحراري في جدار مستوي وحيد الطبقة كما يلي (الشكل 5.1a):

(50.1)

$$Q = A (\lambda / \delta) (t_1 - t_2) = A (t_1 - t_2) / R \quad [\text{W}]$$

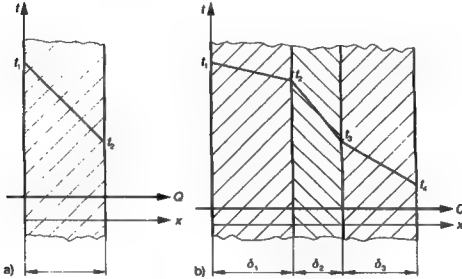
حيث: A سطح الجدار $[\text{m}^2]$

λ عامل التوصيل الحراري للجدار $[\text{W/m K}]$

δ سماكة الجدار

t_1 و t_2 درجة حرارة السطوح الخارجية للجدار $[\text{°C}]$

R المقاومة الحرارية للجدار $[\text{m}^2 \text{K/W}]$.



الشكل 5.1: (a) التوصيل الحراري لجدار مستو أحادي الطبقة، (b) التوصيل الحراري لجدار مستو متعدد الطبقات

أما المقاومة الحرارية للجدار فتحسب كما يلي:

$$(51.1) \quad R = \delta / \lambda \quad [\text{m}^2 \text{K/W}]$$

وكثافة التيار الحراري:

$$(52.1) \quad q = (t_1 - t_2) / R \quad [\text{W/m}^2]$$

جدار متعدد الطبقات

يتألف الجدار في كثير من الأحيان من عدة مواد. يمثل الشكل (b5.1) جداراً مستوياً ثلاثي الطبقات. سمات هذه الطبقات δ_1 و δ_2 و δ_3 ، درجة حرارة السطح الداخلي t_1 و t_4 . إذا كانت المقاومة الحرارية لطبقة الجدار، هي $R_i = (\delta / \lambda)_i$ فإن كثافة التيار الحراري q تحسب كما يلي:

$$(53.1) \quad q = (t_1 - t_2) / R_1 = (t_2 - t_3) / R_2 = (t_3 - t_4) / R_3 = (t_1 - t_4) / (R_1 + R_2 + R_3)$$

أما درجات الحرارة عند السطوح الحديدية للطبقات المختلفة للجدار:

$$(54.1) \quad t_3 = t_1 - q (R_1 + R_2) = t_4 + q R_3 \text{ و } t_2 = t_1 - q R_1$$

مثال 7.1

يتألف جدار مرجل من طين حراري بسماكة 300 mm وطبقة عازلة من خبث الصوف سماكتها 120 mm. مساحة سطح الجدار 20 m². ما هي قيمة التيار الحراري ودرجة الحرارة بين طبقتين درجتا حرارتهما $t_1 = 400^\circ\text{C}$ و $t_3 = 50^\circ\text{C}$ عامل التوصيل الحراري للطين الحراري W/mK1 وخبث الصوف 0.05 W/mK.

الحل:

1. المقاومة الحرارية للطين الحراري:

$$R_1 = (\delta / \lambda)_1 = (0.3 / 1) = 0.3 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

المقاومة الحرارية لخبث الصوف:

$$R_2 = (\delta / \lambda)_2 = (0.12 / 0.05) = 2.4 \text{ m}^2 \text{ K/W}$$

2. التيار الحراري:

$$Q = (t_1 - t_3) A / (R_1 + R_2)$$

$$= (400 - 50) \text{ K} \times 20 \text{ m}^2 / (0.3 + 2.4) \text{ m}^2 \text{ K/W} = 2592.6 \text{ W}$$

3. درجة الحرارة بين طبقة الطين الحراري وعازل خبث الصوف:

$$t_2 = t_1 - (Q / A) R_1 = 400 - (2592.6 \text{ W} / 20 \text{ m}^2) 0.3 \text{ m}^2 \text{ K/W} = 361.1^\circ\text{C}$$

جدار أنبوبي

يُحسب التيار الحراري لأنبوب جداره رقيق وطوله / أكبر بكثير من سماكته δ كما يلي:

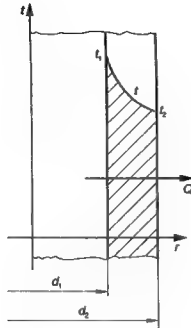
$$(55.1) \quad Q = l (t_1 - t_2) / R_1 \text{ [W]}$$

حيث: t_1 درجة حرارة الجدار الداخلي و t_2 للجدار الخارجي. R_1 المقاومة الحرارية بالنسبة لـ

1 m من طول الأنبوب:

$$(56.1) \quad R_1 = (1 / 2\pi \lambda) \ln (d_2 / d_1) \text{ [m K/W]}$$

حيث: d_1 القطر الداخلي، d_2 القطر الخارجي [m].



الشكل 6.1: التوصيل الحراري في جدار أسطواني.

وبالتالي تصبح العلاقة السابقة بالشكل:

$$(57.1) \quad Q = l(t_1 - t_2) / [(1 / 2\pi \lambda) \ln (d_2/d_1)] \quad [w]$$

2.5.1 انتقال الحرارة بالحمل

معادلة نيوتون

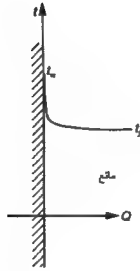
تنتقل الحرارة بالحمل بفعل تلامس مائع حار مع جسم صلب (جدار، صحيفة، أنبوب) كما في الشكل (7.1). وهناك نوعان من الحمل هما الحمل الطبيعي (الحر) والحمل القسري. يُحسب التيار الحراري بفعل الحمل من معادلة نيوتون:

$$(58.1) \quad Q = \alpha (t_w - t_f) A \quad [W]$$

حيث α عامل انتقال الحرارة $[W/(m^2K)]$

t_w درجة حرارة الجدار، t_f درجة حرارة المائع $[^\circ C]$

A مساحة السطح $[m^2]$.



الشكل 7.1 : انتقال الحرارة بالحمل.

يرتبط انتقال الحرارة بعامل انتقال الحرارة α الذي يتعلق بدوره بفرق درجات الحرارة بين الجسم الصلب والمائع، وبنوع المائع وموصفاته، وبشكل الجسم وحجمه ووضعه. لهذه العلاقات طبيعة معقدة لا يمكن دراستها إلا عن طريق اختبارات تجريبية ووضعها على شكل معادلات لا بعدية.

الأرقام اللابعدية

يتم حساب انتقال الحرارة بالحمل عن طريق معادلات تجريبية تتضمن الأرقام اللا بعدية التالية:

$$(59.1) \quad Nu = \alpha L / \lambda \quad \text{رقم نوسيل}$$

$$(60.1) \quad Re = w L / \nu \quad \text{رقم رينولدز}$$

$$(61.1) \quad Pr = \nu / a = \mu c_p / \lambda \quad \text{رقم برانتل}$$

$$(62.1) \quad Gr = (g L^3 / \nu^2) \beta \Delta T \quad \text{رقم غراس هوف}$$

$$(63.1) \quad Ra = Gr Pr = g \beta \Delta T L^3 / (\nu a) \quad \text{رقم ريليه}$$

حيث: α عامل انتقال الحرارة $[W/(m^2K)]$

L الطول المميز (مثلاً قطر انبوب d) $[m]$

λ قابلية المائع لتوصيل الحرارة (الناقلية الحرارية) $[W/(m K)]$

w سرعة الجريان $[m/s]$

ν اللزوجة التحريكية للمائع [m²/s]

α النفوذية الحرارية للمائع [m²/s]

μ اللزوجة الديناميكية للمائع [Pa.s]

c_p السعة الحرارية بثبوت الضغط [J/kgK]

g التسارع الأرضي (9.81m/s²) [m/s²]

β عامل التمدد الحجمي للمائع [1/K]

ΔT فرق درجات الحرارة [K]

يمكن الحصول على القيم المميزة للمائع (الكثافة ρ ، عامل توصيل الحرارة λ ، السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط، اللزوجة الديناميكية μ أو التحريكية ν) من جداول خاصة وذلك عند درجات حرارة وسطية للمائع.

يُحسب عامل انتقال الحرارة كما يلي:

$$(64.1) \quad \alpha = Nu \lambda / L \quad [W/(m^2 K)]$$

انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي

ينشأ الحمل الطبيعي في المائع بفعل قوة الرفع التي يسببها فرق الكثافة بين الجزئين الساخن والبارد من المائع بملامسة السطح الذي يعطيه حرارة (سطح الجسم الصلب) والذي يتمتع بدرجة حرارة أعلى، وبسبب ذلك يصبح أخفّ وينزاح نحو الأعلى، وهكذا يحدث انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي.

من أجل الحمل الطبيعي تستخدم العلاقة التالية:

$$(65.1) \quad Nu = m R_{\alpha}^n$$

حيث: L الطول المميز المستخدم في حساب الأرقام اللابعديّة في المعادلة (65.1)

α عامل انتقال الحرارة بحسب للمعادلة (64.1)

h الارتفاع في حالة الأنابيب الشاقولية أو الصفائح

d القطر في حالة الكرات والأنابيب الأفقية، والأبعاد الصغيرة للصفائح الأفقية.

في حالة الصفائح الأفقية يتم ضرب قيمة α المحسوبة بالعامل (1.3 أو 0.7) وفقاً لانتقال الحرارة نحو الأعلى أو نحو الأسفل.

المجدول 2.1: العامل m والأس n للمعادلة 65.1

رقم بلية Ra	العامل m	الأس n
أقل من 500	1.18	1/8
من 500 حتى $2 \cdot 10^7$	0.54	1/4
من $2 \cdot 10^7$ حتى 1.10^{13}	0.135	1/3

درجة الحرارة القياسية لحساب المقادير المذكورة هي:

$$t_m = 0.5 (t_w + t_p)$$

وبطريقة تقريبية يمكن حساب α وفق علاقة مبسطة. فمثلاً يمكن حساب α بين أنبوب معزول (درجة حرارة الجدار t_w) والهواء (درجة حرارته t_f) بالعلاقة:

$$\alpha = 9.4 + 0.052 (t_w - t_f) \quad (66.1)$$

مثال 8.1

من أجل أنبوب درجة حرارة جداره $t_w = 50^\circ\text{C}$ ، حوله هواء درجة حرارته $t_f = 15^\circ\text{C}$ يُطلب حساب تيار الضياع الحراري Q_L لهذا الأنبوب إذا كان قطره الخارجي $d = 80 \text{ mm}$ وطوله $l = 5 \text{ m}$.

الحل

تُحسب α من العلاقة (66.1) كما يلي:

$$\begin{aligned} \alpha &= 9.4 + 0.052 (t_w - t_f) \\ &= 9.4 + 0.052 (50 - 15) = 11.22 \text{ W / m}^2\text{K} \end{aligned}$$

وبالتالي فتتار الضياع الحراري:

$$\begin{aligned} Q_L &= \pi d l \alpha (t_w - t_f) \\ &= \pi 0.080 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 11.22 \text{ W/m}^2 \text{ K} (50 - 15) \text{ K} \\ &= 493.48 \text{ W} \end{aligned}$$

الحمل الحراري القسري

يتحرك المائع في هذه الحالة تأثير قوة ضغط مروحة أو مضخة. في محطات توليد الطاقة يوجد هذا الحمل في حالة الجريان الداخلي ضمن الأنابيب أو الأقبية وكذلك في حالة الجريان الخارجي حول الصفائح أو الأنابيب أو حول حزم الأنابيب في المبادلات الحرارية. يكون الجريان صفائحياً أو مضطرباً وذلك تبعاً لـ: سرعة الجريان w ، أبعاد المجرى (مثلاً قطره d). اللزوجة التحريكية للمائع ν فإذا كان رقم رينولد أقل من 2320 فالجريان صفائحي وإذا كان أكبر من 10000 فالجريان كامل الاضطراب وبين القيمتين السابقتين يكون الجريان انتقالياً. تتم مراعاة المواصفات الفيزيائية للمائع عن طريق رقم برانتل.

من أجل جريان مضطرب في أنبوب أو قناة يكون:

$$Nu = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} [1 + (d/l)^{2/3}] (Pr / Pr_w)^{0.11} \quad (67.1)$$

حيث: d قطر الأنبوب و l طوله [m].

المعادلة السابقة صالحة للمجال $[Re > 2320 \text{ حتى } 500 \text{ و } Pr = 1.5]$

يتم اختيار $(\lambda \text{ و } \nu)$ و Pr للمائع عند درجة حرارة وسطية للمائع t_m ، أما Pr_w فتؤخذ عند درجة حرارة الجدار t_w .

هنالك قيم يمكن الاسترشاد بها لـ α عند الحمل القسري أو الطبيعي كما يبين الجدول 3.1.

الجدول 3.1: قيم استرشادية لعامل انتقال الحرارة α

α [W/m ² K]	نوع الحمل	الوسط
20-5	حر	هواء — غازات
100-10	قسري	هواء — غازات
1000-200	حر	ماء
10000-1000	قسري	ماء
15000-1500	غليان	ماء
15000-3000	تكاثف	بخار

3.5.1 انتقال الحرارة بالإشعاع

الامتصاص، الانعكاس، التحريك

يقصد بالإشعاع الحراري تلك الإشعاعات الكهرومغناطيسية التي يتراوح طول موجاتها λ بين $0.25 \mu\text{m}$ و $800 \mu\text{m}$ ويتم إصدارها وامتصاصها من الأجسام الصلبة والسائلة والغازية.

عندما يصادف تيار إشعاع حراري جسماً فإنه يتم امتصاصه أو انعكاسه أو تمريره ويكون:

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (68.1)$$

حيث: α نسبة الامتصاص

ρ نسبة الانعكاس

τ نسبة التمرير.

تتعلق القيم (α, ρ, τ) لجسم أسود بمادته ودرجة حرارته ونعومة سطحه الخارجي. من أجل جسم كامل السواد (أسود مطلق) يمتص الإشعاع بشكل كامل فإن درجة الامتصاص $\alpha = 1$ ، أما للجسم الذي تكون عاكسيته مثالية فإن $\tau = 0$ و $\alpha + \rho = 1$.

يمكن اعتبار السطوح الخارجية للآلات رمادية، ومن أجل الجسم الرمادي لا تتعلق درجة الامتصاص α بطول الموجات وهي أقل من 1. من أجل مواد ذات امتصاصية وتمريرية مختارة (مثل الغازات الثنائية الذرات، وبخار الماء، وثنائي أكسيد الكربون) تتعلق درجة الامتصاص α_λ بطول الأمواج λ . وهي تمتص وتمرر الأشعة ذات أطوال الموجات المختلفة بشدات مختلفة.

قوانين الإشعاع

تُعرف شدة الإشعاع الطيفي $I_{\alpha\lambda}$ بأنها كمية الطاقة التي يمتصها 1 m^2 من السطح الخارجي للجسم كل ثانية، وذلك من الموجات التي يقع طولها في المجال $1 \mu\text{m}$. وبحسب قانون بلانك فإنه من أجل الجسم الأسود يكون $\alpha = 1$ وبالتالي:

$$I_{\alpha\lambda} = C_1 / \lambda^5 (e^{C_2/T} - 1) \quad [\text{W/m}^2 \mu\text{m}] \quad (69.1)$$

حيث: T درجة الحرارة [K]

λ طول الموجة [μm] [$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$]

C_1 ثابت قيمته $3.7405 \times 10^{-16} [\text{W m}^2]$ ، C_2 ثابت قيمته $0.0143879 [\text{m K}]$.

بحسب قانون فين (Wien) تنساح شدة الإشعاع الأعظمية مع ازدياد درجة الحرارة وذلك باتجاه الموجات الأقصر. إن جداء طول الموجة λ_{\max} الذي تبلغ شدة الإشعاع لجسم أسود عنده قيمتها الأعظمية بدرجة الحرارة T يبقى ثابتاً: $\lambda_{\max} \cdot T = 2897 \times 8 \mu\text{m K}$.

أما قانون شتيفان بولتزمان فيعطي كثافة تيار الإشعاع E_0 لجسم أسود عند درجة حرارة T ، وهو ما يصدره الجسم من كل 1 m^2 في الثانية الواحدة:

$$E_0 = \sigma T^4 = C_0 (T/100)^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (70.1)$$

حيث: σ ثابت شتيفان — بولتزمان $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$

$C_0 = 5.67 \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4)$ عامل الإشعاع للجسم الأسود

تُعطي كثافة التيار الحراري لجسم رمادي (لآلة) بالعلاقة:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (71.1)$$

حيث: ε درجة الإصدار

$C = \varepsilon C_0$ عامل إشعاع الجسم الأسود $[\text{W/(m}^2 \text{ K}^4)]$.

بحسب قانون كيرشوف فإنه للجسم الرمادي ومن أجل طول محدد للموجات تكون قيمة عامل الامتصاص α مساوية (عند نفس الطول للموجات) لقيمة عامل الإصدار، وذلك عند نفس درجات الحرارة للجسم الممتص والمُصدر. وبشكل تقريبي يمكن استخدام قيم α و ε من أجل كل مجال أطوال للموجة.

التبادل الحراري بالإشعاع

إن حساب الإشعاع المتبادل بين السطوح الرمادية المتوضعة بشكل غير محدد بالنسبة لبعضها البعض عملية شديدة التعقيد، وهناك حالتان خاصتان يمكن حساب التبادل الحراري بالإشعاع فيهما، ويفترض فيهما أن السطوح مفصولة عن بعضها بوسط يمر الإشعاع (مثل الهواء).

الحالة الأولى: التبادل بالإشعاع بين سطحين متوازيين لهما نفس المساحة $A \text{ [m}^2]$ (الشكل 8.1.1).

بحسب تيار الإشعاع الصافي من السطح الساخن 1 إلى السطح البارد 2 من العلاقة التالية:

$$Q = A \varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) = A C_{12} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \quad [\text{W}] \quad (72.1)$$

أما درجة الإصدار الصافي فتحسب بالعلاقة:

وعامل الإشعاع: $\epsilon_{12} = 1 / [(1 / \epsilon_1) + (1 / \epsilon_2) - 1]$
 (73.1) $C_{12} = 1 / [(1 / C_1) + (1 / C_2) - (1 / C_0)]$

حيث: $C_2 = \epsilon_2 C_0$ أو $C_1 = \epsilon_1 C_0$

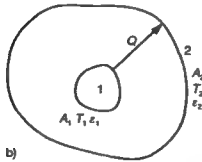
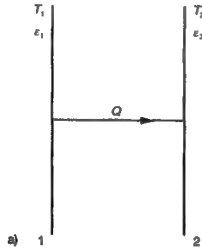
وعامل الإشعاع للسطح 1 أو 2 هو $C_0 = 5.67 \text{ W/m}^2 \text{K}^4$

الحالة الثانية: التبادل بالإشعاع بين سطح محدب وغلافه (الشكل 8.1.1)

بحسب تيار الإشعاع الصافي من الجسم 1 إلى الغلاف 2 من العلاقة التالية:

(74.1) $Q = \epsilon_{12} A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = C_{12} A_1 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \text{ [W]}$

حيث: A_1 مساحة سطح الجسم 1.



الشكل 8.1: التبادل الحراري بالإشعاع بين (a) السطوح المستوية المتوازية (b) جسم وغلافه.

أما درجة الإصدار الفعال ϵ_{12} أو عامل الإشعاع C_{12} فتحسب من العلاقة التالية:

$$(75.1) \quad \begin{aligned} \varepsilon_{12} &= 1 / [1/\varepsilon_1 + (1/\varepsilon_2 - 1)(A_1/A_2)] \\ C_{12} &= 1 / [(1/C_1 + (1/C_2 - 1/C_0)(A_1/A_2))] \end{aligned}$$

عندما تكون المساحة A_1 أصغر بكثير من A_2 يصبح:

$$(76.1) \quad C_{12} = C_1, \quad \varepsilon_{12} = \varepsilon_1$$

وينتج عامل انتقال الحرارة بالإشعاع من العلاقة التالية:

$$(77.1) \quad \alpha_{\text{rad}} = Q / [A (T_2 - T_1)] \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \text{K})]$$

أو

$$(78.1) \quad \begin{aligned} \alpha_{\text{rad}} &= \varepsilon_{12} \sigma (T_2 + T_1) (T_2^2 + T_1^2) \\ &\cong 4 \varepsilon_{12} \sigma T_m^3 \quad [\text{W} / (\text{m}^2 \text{K})] \end{aligned}$$

حيث: T_m درجة الحرارة الوسطية للمنظومة $[K]$ $T_m = 0.5 (T_1 + T_2)$

9.1 مثال

يطلب حساب عامل انتقال الحرارة للتبادل الحراري بالإشعاع بين سطحين مستويين أحدهما

درجة حرارته $T_1 = 300^\circ \text{C}$ ودرجة إصداره $\varepsilon_1 = 0.9$ والجسم الثاني درجة حرارته $T_2 = 600^\circ \text{C}$

ودرجة إصداره $\varepsilon_2 = 0.8$.

الحل:

درجة الإصدار:

$$\varepsilon_{12} = 1 / (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1) = 1 / (1/0.9 + 1/0.8 - 1) = 0.735$$

ومنه فعامل انتقال الحرارة بالإشعاع:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{rad}} &= \varepsilon_{12} \sigma (T_1^4 - T_2^4) / (T_1 - T_2) \\ &= 0.735 \times 5.67 \times 10^{-8} (873^4 - 573^4) / (873 - 573) \\ &= 65.7 \text{ W} / (\text{m}^2 \text{K}) \end{aligned}$$

4.5.1 المبادلات الحرارية

نفوذ الحرارة

عند نفوذ الحرارة عبر جدارٍ مستوي سمكه δ ومساحته A ولمادته عامل توصيل حراري λ ،

يفصل بين وسطين درجتا حرارتهما مختلفتان t_1 و t_2 فإن التيار الحراري عبر الجدار يحسب من

العلاقة التالية:

(79.1)

$$Q = k A (t_1 - t_2) \quad [W]$$

وعامل نفوذ الحرارة k :

$$(80.1) \quad k = 1 / (1 / \alpha_1 + \delta / \lambda + 1 / \alpha_2) \quad [W/(m^2 K)]$$

حيث: α_1 و α_2 عامل انتقال الحرارة عند السطحين الداخلي والخارجي للجدار. ونتجت درجتا حرارة سطحي الجدار:

$$t_{w1} = t_1 - Q / (A \alpha_1)$$

$$(81.1) \quad t_{w2} = t_2 + Q / (A \alpha_2) \quad \text{و}$$

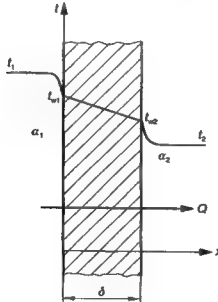
من أجل الجدران المتعددة الطبقات يعوض عن (δ/λ) في المعادلة 80.1 بالمقدار $\sum (\delta/\lambda)$ الذي هو مجموع المقاومات الحرارية لمختلف الطبقات.

عند نفوذ الحرارة عبر جدار أسطواني (أنبوب طويل جداً) فإن التيار الحراري يحسب كما يلي:

$$Q = k_1 A_1 (t_1 - t_2) = k_m A_m (t_1 - t_2)$$

$$(82.1) \quad = k_2 A_2 (t_1 - t_2) = k_1 l (t_1 - t_2) \quad [W]$$

حيث: k_1, k_2, k_m عوامل نفوذ الحرارة عند السطح الداخلي، الخارجي، الوسطي $[W/(m^2 K)]$ عامل نفوذ الحرارة على طول الأنبوب $[W/(m K)]$.



الشكل 9.1 : نفوذ الحرارة عبر جدارٍ مستوي.

تُحسب مساحة السطح الداخلي والخارجي والوسطي كما يلي:

$$(83.1) \quad A_1 = \pi d_1 l, \quad A_2 = \pi d_2 l, \quad A_m = \pi d_m l \quad [m^2]$$

حيث: d_1 ، d_2 ، d_m القطر الداخلي والخارجي والوسطي للأنبوب على التوالي [m].
العلاقة بين عوامل نفوذ الحرارة السطحية والطولية هي:

$$(84.1) \quad k_1 A_1 = k_m A_m = k_2 A_2 = k_l l$$

عامل نفوذ الحرارة لوحدة الطول:

$$k_l = Q / l (t_1 - t_2) = 1 / (\pi d_1 \alpha_1) + (1/2 \pi \lambda)$$

$$(85.1) \quad \ln (d_2 / d_1) + 1 / (\pi d_2 \alpha_2)] \quad [W/m K]$$

أما عامل نفوذ الحرارة لوحدة السطح:

$$(86.1) \quad k_m = k_1 / \pi d_m \quad \text{و} \quad k_2 = k_1 / \pi d_2, \quad k_1 = k_l / \pi d_1$$

10.1 مثال

ما هي قيمة التيار الحراري الضائع من غازات احتراق ساحة درجة حرارتها 400 °C عبر جدار من الطين الحراري سماكته 350 mm وعامل توصيله للحرارة 1 W/m K إلى الوسط الحراري المحيط الذي درجة حرارته 25 °C؟ مساحة الجدار 20 m²، وعامل انتقال الحرارة عند الجهة الداخلية للجدار 80 وعند الجهة الخارجية له 12 W/m² K.

الحل:

1. عامل انتقال الحرارة:

$$k = 1 / (1 / \alpha_1 + \delta / \lambda + 1 / \alpha_2) \\ = 1 / (1/80 + 0.35/1 + 1/12) = 2.24 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

2. تيار الضياع الحراري:

$$Q = k A (t_1 - t_2) \\ = 2.24 \text{ W/m}^2 \text{K} \times 20 \text{ m}^2 (400 - 25) \text{ K} = 16800 \text{ W}$$

المبادلات الحرارية الاسترجاعية

تستخدم في محطات تحويل الطاقة مبادلات حرارية ذات أنواع مختلفة وغالباً تستخدم الأنواع الاسترجاعية التي تأخذ شكل أنبوب مزدوج، أو حزمة أنابيب، أو على شكل صفائح. يتم في

المبادلات الاسترجاعية انتقال الحرارة من الوسيط الساخن إلى الوسيط البارد عن طريق سطح تسخين يلامس كلا المائعين (يدعى هذا السطح حامل الحرارة). كما تستخدم على نطاق ضيق المبادلات المتجددة، مثلاً في مسخنات الهواء، وفي المبادلات الحرارية من هذا النوع تستخدم كتلة للتخزين تأخذ الحرارة من المائع الساخن ثم تعطيها للمائع (الوسيط) البارد. تقسم المبادلات الحرارية الاسترجاعية بحسب وضعية الجريان إلى مبادلات ذات جريان متماثل وأخرى ذات جريان متعاكس وثالثة ذات جريان متصالب.

الاستطاعة الحرارية لمبادل حراري استرجاعي ويإهمال الضياعات الحرارية يمكن حسابها من موازنة الطاقة:

$$(87.1) \quad Q = m_1(h_{1ent} - h_{1exit}) = m_2(h_{2exit} - h_{2ent}) \quad [W]$$

حيث: m التدفق الكتلي لحامل الحرارة [kg/s]
 h_{ent} انتالبي الدخول، h_{exit} انتالبي الخروج لحامل الحرارة [J/kg]، الدليل 1 للطرف الساخن، والدليل 2 للطرف البارد في المبادلات الحرارية.
 وعندما لا يحدث تغير في حالة الوسيط (تبخّر أو تكاثف) يمكننا كتابة العلاقة التالية:

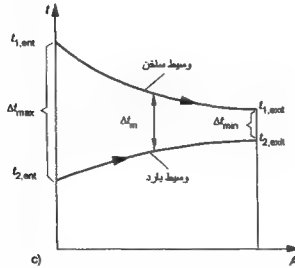
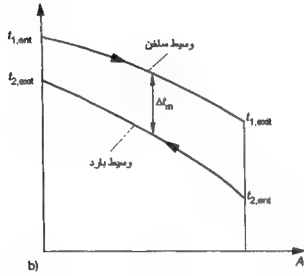
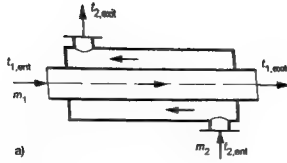
$$(88.1) \quad \begin{aligned} Q &= (m c_p)_1 (t_{1ent} - t_{1exit}) \\ &= (m c_p)_2 (t_{2exit} - t_{2ent}) \end{aligned}$$

حيث: C_p السعة الحرارية النوعية للحامل الحراري [J / kg K]
 t_{ent} درجة حرارة الدخول للحامل الحراري، t_{exit} درجة حرارة الخروج للحامل الحراري [°C].

يُحسب فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغاريتمي كما يلي:

$$(89.1) \quad \Delta t_m = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln (\Delta t_{max} / \Delta t_{min})$$

حيث: Δt_{max} فرق درجات الحرارة الأعظمي
 Δt_{min} فرق درجات الحرارة الأصغري.



الشكل 10.1 : مبادل حراري وأنبوب مزدوج (a) مخطط مبادل حراري جريانه متعاكس (b) تغير درجة حرارة حوامل الحرارة في مبادل حراري متعاكس (c) تغير درجة حرارة حوامل الحرارة في مبادل حراري متماثل.

٢ — من أجل المبادل الحراري ذي الجريان المتعاكس (الشكل 10.1b)

$$\Delta t_{\max} = t_{1\text{ent}} - t_{2\text{exit}}$$

$$(90.1) \quad \Delta t_{\min} = t_{1\text{exit}} - t_{2\text{ent}} \quad \text{و}$$

ب — من أجل المبادل الحراري ذي الجريان المتساوي الاتجاه (10.1c)

$$\Delta t_{\max} = t_{1\text{ent}} - t_{2\text{exit}}$$

$$(91.1) \quad \Delta t_{\min} = t_{1\text{exit}} - t_{2\text{ent}} \quad \text{و}$$

إذا كان $\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min} < 1.7$ يُستخدم فرق درجات حرارة وسطي حسابي:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{\max} + \Delta t_{\min}) / 2$$

ومساحة المبادل الحراري:

$$(92.1) \quad A = Q / (k \Delta t_m) \quad [\text{m}^2]$$

مثال 11.1

يُطلب حساب فرق درجات الحرارة الوسطي اللوغاريتمي لمبادل حراري متماثل الاتجاه ولبادل حراري متعاكس الاتجاه. درجات حرارة الدخول والخروج للحامل الحراري الساخن هي 90 و 50 °C وللحامل الحراري البارد هي 10 و 30 °C.

الحل

من أجل المبادل الحراري المتماثل الاتجاه:

$$\Delta t_m = [(90 - 10) - (50 - 30)] \ln [(90 - 30) / (40 - 30)] = 43.28 \text{ K}$$

ومن أجل المبادل الحراري المتعاكس الاتجاه:

$$\Delta t_m = [(90 - 30) - (50 - 10)] \ln [(90 - 30) / (50 - 10)] = 49.33 \text{ K}$$

إن فرق درجات الحرارة الوسطي للمبادل المتعاكس الاتجاه أكبر دائماً من فرق درجات الحرارة الوسطي للمبادل المتماثل الاتجاه، ولذلك فسطح التسخين اللازم لتبادل نفس التيار الحراري يكون في المبادل المتعاكس الاتجاه أصغر.

6.1 أسس هندسة الجريان

تتألف هذه الأسس من معادلة الطاقة ومعادلة الاستمرار وقانون تغير كمية الحركة.
من أجل جريان كظيم للمائع غير قابل للانضغاط (جريان سوائل، جريان غازات مع تغير ضئيل للضغط)، وإذا لم يكن هناك ضياعات ضغط، أي بدون احتكاك، عندئذ تنص معادلة برنولي على:

$$(93.1) \quad p + p_{dyn} + \rho g z = \text{const}$$

حيث: p الضغط الستاتيكي (السكوني) [Pa]

p_{dyn} الضغط الديناميكي (الحركي) [Pa]

ρ الكتلة النوعية للمائع [kg/m^3]

g التسارع الأرضي [m/s^2]

z ارتفاع المقطع عن المستوى المرجعي (مستوى المقارنة).

أما الضغط الديناميكي فيعطى بالعلاقة:

$$(94.1) \quad p_{dyn} = 0.5 \rho w^2 \quad [\text{Pa}]$$

حيث: w سرعة الجريان [m/s].

تقوم معادلة الاستمرار على قانون انحفاظ الكتلة، الذي ينص على أنه في حالة جريان مستقر (غير متغير المواصفات مع الزمن)، فإن كمية المائع [kg/s] التي تجري عند كل مقطع ثابتة. فمثلاً من أجل المقطعين 1 و 2:

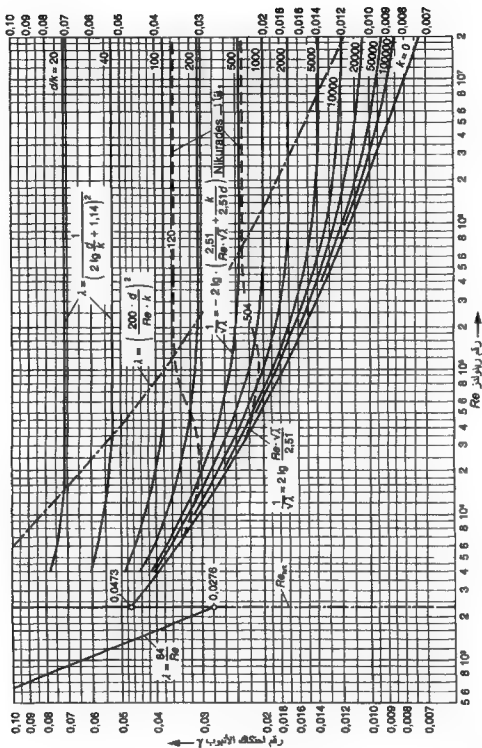
$$(95.1) \quad m = \rho_1 A_1 w_1 = \rho_2 A_2 w_2 = \text{const}$$

من أجل الوسائط غير القابلة للانضغاط فإن ($\rho_1 = \rho_2 = \rho$) ومن ثم فالتدفق الحجمي يبلغ:

$$(96.1) \quad V = m / \rho = A_1 w_1 = A_2 w_2 \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

يتألف الضياع الإجمالي في الضغط في أنبوب من ضياع الضغط بفعل الاحتكاك Δp_f وضياعات الضغط عند المقاومات المختلفة Δp_n (الضياعات الموضعية).

$$(97.1) \quad \Delta p_v = \Delta p_f + \Delta p_n \quad [\text{Pa}]$$



الشكل 11.1 : مخطط مودي [Moody - Diagram] لحساب عامل الاحتكاك في الأنابيب.

بحسب هبوط الضغط بفعل الاحتكاك في الأنابيب المستقيمة ذات المقطع الثابت بمعرفة عامل الاحتكاك للأنبوب λ وسرعة الجريان v وقطر الأنبوب الداخلي d وطول الأنبوب L كما يلي:

$$(98.1) \quad \Delta p_f = 0.5 \lambda \rho w^2 L / d$$

من أجل الجريان الداخلي الصفائحي (أي عندما يكون رقم رينولدز أصغر من $Re < 2320$) بحسب عامل الاحتكاك كما يلي:

$$(99.1) \quad \lambda = 64 / Re$$

من أجل جريان داخلي مضطرب تتعلق λ (بالإضافة إلى Re) بخشونة جدار الأنبوب k . يمكن حساب قيم عامل الاحتكاك للأنبوب λ من الجدول (4.1) الذي يتضمن علاقات الحساب اللازمة. أما الحصول على قيمة عامل الاحتكاك λ فيتم من مخطط مودي (Moody) المبين في الشكل (11.1).

وللأنية التي مقطعها غير دائري (مساحة مقطعها A ومحيطها U) يستخدم القطر المكافئ.

$$(100.1) \quad d_{eq} = 4A / U$$

حيث: $d_{eq} = D - d$ من أجل الحلقة التي قطرها الخارجي D والداخلي d

$$d_{eq} = 2a \cdot b / (a + b) \text{ من أجل المستطيل الذي بعده } a \times b.$$

لحساب هبوط الضغط في المقاومات الموضعية (تغير المقطع، تفرع أنبوب، الصمامات... الخ) تطبق العلاقة التالية:

$$(101.1) \quad \Delta p_e = \xi \rho w^2 / 2$$

حيث: ξ عامل الضياع (المقاومة).

إذا كانت هناك عدة مقاومات تقع خلف بعضها البعض فإن هبوط الضغط الإجمالي (عند ثبات سرعة الجريان):

$$(102.1) \quad \Delta p_{tot} = (\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \dots) \rho w^2 / 2 \text{ [Pa]}$$

يمكن الحصول على عوامل الضياعات ξ للمقاومات الموضعية (من أجل تغير منتظم أو غير منتظم للمقطع، الأكواع، صمامات التحكم أو الإغلاق، صمامات الخنق، السكورة) من المراجع الاختصاصية [2.1].

الجدول 4.1: علاقات عامل احتكاك الأنابيب λ عند جريان داخلي مضطرب

المعادلة	المعلقة حسب	بمال رقم رينولدز
الأنابيب الهيدروليكية الناعمة ($Re/d < 65$)		
$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$	Blasius	$2320 < Re < 10^5$
$1/\sqrt{\lambda} = 2 \lg (Re\sqrt{\lambda} / 2.51)$	Prandtl/van Karman	$10^5 < Re < 3.10^6$
الأنابيب الهيدروليكية الخشنة		
$\lambda = 21g (3.715 d / k)$	Nikuradse	$Re k / d > 1300$
$1/\sqrt{\lambda} = -2 \lg [3.715 d / k + 2.51 / (Re\sqrt{\lambda})]$	Colebrook	$65 < Re k / d < 1300$

مثال 12.1

ما هو هبوط الضغط في أنبوب ماء ناعم هيدروليكيًا قطره 30 mm وطوله 20 m عند سرعة جريان 1 m/s. درجة حرارة الماء 20°C.

الحل

1. عند درجة الحرارة 20°C فإنه يمكن تحديد مواصفات الماء من الجدول A.1:

الكتلة النوعية: $\rho = 998.2 \text{ kg / m}^3$ ، اللزوجة التحريكية $\nu = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

2. رقم رينولدز $Re = w d / \nu$ وبالتعويض

$$Re = 1 \text{ m / s} \times 0.03 \text{ m} / 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 29880.5$$

3. عامل الاحتكاك $\lambda = 0.3164 / Re^{0.25}$ وبالتعويض

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} = 0.3164 / 29880.5^{0.25} = 0.024$$

4. هبوط الضغط: $\Delta P = \lambda (L / d) \rho v^2 / 2$ بالتعويض:

$$\Delta P = 0.024 (20 \text{ m} / 0.03 \text{ m}) 998.2 \text{ kg / m}^3 (1 \text{ m / s})^2 / 2 = 7986 \text{ Pa}$$

2 الوقود والاحتراق

1.2 التركيب والقيمة الحرارية

تركيب الوقود الصلب والسائل

يحتوي الوقود أجزاءً قابلة للاحتراق وأخرى غير قابلة للاحتراق. الأجزاء القابلة للاحتراق هي الكربون والهيدروجين والكبريت، أما الأجزاء غير القابلة للاحتراق فهي الآزوت (نتروجين) والرماد والماء. من أنواع الوقود الصلب هناك الفحم الحجري والفحم البنسي والخشب والتورف (فحم المستنقعات)، بالإضافة إلى النفايات القابلة للاحتراق.

عند تسخين وقود صلب إلى درجة الحرارة 900°C تنطلق المركبات الطيارة قبل بدء الاحتراق. تتراوح نسبة الأجزاء الطيارة في الفحم الحجري بين 10 % (للاتراسيت) و 28 إلى 50 % للفحم الذي يحوي نسبة عالية من البيتومين (الفار).

تستخدم محطات الطاقة أنواع سائلة من الوقود هي نواتج النفط مثل الوقود الثقيل (الفيول) أو الخفيف (المازوت). يتألف الوقود الثقيل من مزيج من الفحم الهيدروجينية مع روابط أكاسيد الآزوت والكبريت، وهو ذو لزوجة عالية عند درجة حرارة الغرفة، ولذا يجب تسخينه (حتى درجة الحرارة 80 إلى 140°C) ثم تذييره (في الحراق بمساعدة الهواء أو البخار) قبل إحراقه. أما الوقود الخفيف فهو يحترق عملياً بدون بقايا ويستعمل للإقلاع ولتنشيط الاحتراق في الغنات الغازية.

يُعطى تركيب الوقود الصلب أو السائل بناءً على التحليل العنصري كما يلي:

$$(1.2) \quad C + H + S + N + O + A + W = 100 \%$$

وتمثل رموز هذه المعادلة: C النسبة الوزنية للكربون في الوقود [%]، H للهيدروجين، S للكبريت، N للأزوت، A للرماد، W للماء.

يعتبر الرماد والماء عناصر عديمة الفائدة في الوقود، وتبلغ نسبة الرماد في الفحم البنسي 3 إلى 8 %، أما نسبة الساء فهي 45 - 60 %، وفي قوالب الفحم تبلغ نسبة الرماد 5 إلى 11 % والماء حتى 15 %. القيمة الوسطية للرماد (A) في الفحم الحجري 8 - 10 %. في الانتراسيت نسبة الرماد 3 - 6 % ونسبة الماء 1 حتى 3 %، ما عدا في فحم الكوك فهي بين 3 - 8 %. يؤثر تركيب الرماد وموصافاته (وخاصة ما يسمى درجة حرارة ذوبان الرماد وتحويله إلى خبث) على اختيار نوع الحراق وطريقة الإحراق وكذلك على درجة حرارة حجرة الاحتراق عند مخرج الغازات.

من أجل وقود جاف (خالٍ من الماء) تصلح العلاقة التالية:

$$(2.2) \quad C' + H' + S' + O' + N' + A' = 100 \%$$

وللوقود الخالي من الماء والرماد:

$$(3.2) \quad C'' + H'' + S'' + O'' + N'' = 100 \%$$

يمكن حساب النسبة المئوية لمركبات المادة الجافة (الخالية من الماء) أو الخالية من الرماد من التحليل العنصري لهذه المادة كما يلي، فمثلاً من أجل عتوى الوقود من الفحم:

$$(4.2) \quad C' = \frac{C}{100 - W} \quad \text{أو} \quad C'' = \frac{C}{100 - A - W}$$

القيمة الحرارية الدنيا والعليا للوقود

القيمة الحرارية هي كمية الحرارة التي تتحرر (تنتقل) عند احتراق مركبات الوقود بشكل كامل. وتُنسب هذه القيمة إلى 1 Kg من أجل الوقود الصلب والسائل، وإلى 1 m³ من أجل الوقود الغازي. ويمكن التمييز بين قيمة حرارية عليا ودنيا للوقود. تحسب القيمة الحرارية الدنيا للوقود صلب أو سائل وفق المعادلة التقريبية التالية:

$$(5.2) \quad LCV = 34.8 C + 93.9 H + 10.46 S + 6.28 N - 10.80 O - 2.5 W [\text{MJ/kg}]$$

حيث: C، H، S، N، O، W نسبة كتلة العناصر المذكورة في الوقود [kg/kg].

من أجل مشتقات النفط تحسب القيمة الحرارية الدنيا كما يلي:

$$(6.2) \quad LCV = 33.15 C + 94.1 H + 10.46 (S - O) [\text{MJ/kg}]$$

القيمة الحرارية العليا للوقود HCV أكبر من الدنيا بمقدار انتالبي التبخر لبخار الماء الذي يتشكل باحتراق الهيدروجين ويتبخر الماء الموجود في الوقود. لا يمكن استخدام القيمة الحرارية العليا

للووقود إلاّ عندما يحدث تكاثف لبخار الماء الموجود في غازات الاحتراق ضمن المرجل، أي عندما تُبرّد الغازات إلى ما دون درجة حرارة تكاثف بخار الماء.

هناك علاقة بين LCV و HCV للوقود الصلب والسائل هي:

$$(7.2) \quad HCV = LCV + h_{evn} m_{H_2O} = LCV + 2.5 (9 H + W) \quad [MJ/kg]$$

حيث: H ، W محتوى الوقود من الهيدروجين والماء $[kg/kg]$

h_{evn} الانتالبي النوعي لتبخّر الماء $(2.5 MJ/kg)$ عند الدرجة $0^\circ C$ و 1 bar

m_{H_2O} كمية بخار الماء لكل $1 kg$ وقود $[kg/kg]$.

يتضمن الجدول (1.2) معطيات عن تركيب الوقود الصلب وقيمته الحرارية، بالإضافة إلى القيم النظرية لكمية الهواء اللازم للاحتراق وكمية غازات الاحتراق الجافة والرطبة ومحتوى هذه الغازات من بخار الماء و CO_2 (القيمة الأعظمية).

الجدول 1.2: تركيب الوقود الصلب، قيمته الحرارية الدنيا LCV، كمية الهواء الصغرى اللازمة للاحتراق A_{min} ، حجم غازات الاحتراق الأصغرى الناتجة الرطبة $V_{G,min}$ و $CO_{2,max}$.

الوقود	التكوين الوزني بالـ %							LCV kJ/kg	A_{\min} m ³ /kg	$V_{G,\min}$ i.N.	CO ₂ max كمية حجمية		
	C	H	O	N	S	A	W						
فحم الكوك	86	0,3				1,5	0,7	12	1,5	29300	7,7	7,7	20,7
فحم الكوك													
من منطقة فروهر وأين	73-83	3,4-5,3	1,8-6,5	1,1	0,9	4-7	3-5	30140-33070	7,7-8,3	8,2-8,6	18,3-18,9		
من منطقة بلاد الشام	70-78	4,7-5,2	5,4-12,5	1,2	0,6	3-8	3-5	28050-31400	7,9	8,3	18,7		
الفحم القتي													
من منطقة بلاد فروهر	25-32	2	9-12	0,3	0,2	3	50-60	7530-10460	2,4-3,0	2,4-3,8	19,8		
من منطقة لالوسير	26,6	2,4	12,4	0,4	0,2	3	55	9630	2,6	3,5	19,5		

i.N تعني عند الشروط النظامية ($0^\circ C$, 1.013 bar).

الجدول 2.2: تركيب الوقود السائل، قيمته الحرارية الدنيا LCV، كمية الهواء الصغرى اللازمة للاحتراق A_{min} ، حجم غازات الاحتراق الأصغرى الناتجة الرطبة $V_{G,min}$ و $CO_{2,max}$.

الوقود	القيمة الحرارية عند درجة حرارة $20^\circ C$ kg/m³	C	H	O+N	S	LCV kJ/kg	A_{min} m³/kg	$V_{G,min}$ i.N.	$CO_{2,max}$ كمية حجمية
وقود ثقيل	0,90-0,92	84-88	11-12	1-3	2	39800	10,6	11,4	15,9
الوقود خفيف	0,82-0,86	86-87	13-14	0,5	0,3	42700	11,2	11,8	15,2
البنزين	0,72	85	15	-	-	42700	11,5	12,3	15,0
وقود الديزل (مضغوط)	0,84	86	13	0,2	0,3	41800	11,2	11,9	15,5
زيت القلم البحري	1,06	89	7	3,4	0,6	37700	9,8	9,9	18,1

i.N تعني عند الشروط النظامية ($0^\circ C$, 1.013 bar).

أما الجدول (2.2) ففيه معطيات عن تركيب بعض أنواع الوقود السائل والقيمة الحرارية العليا والدنيا. يتطلب الوقود اللزج تسخيناً أولياً إلى الدرجة 80 وحتّى 140 °C قبل إحراقه.

تركيب الوقود الغازي وقيمته الحرارية

من أنواع الوقود الغازي نذكر الغاز الطبيعي والصناعي (غاز المولد، غاز الفرن العالي، غاز فحم الكوك، الغاز الحيوي، غاز مطهر النفايات، والغاز الناتج عن معالجة مياه المجاري). يُعطى تركيب الوقود الغازي عادة بالنسبة الحجمية (% Vol) لمناصر الغاز المختلفة وذلك عند الشروط النظامية (0 °C، 1.013 bar).

$$(8.2) \quad \text{CH}_4 + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{C}_m \text{H}_n + \text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 + \text{CO}_2 + \text{N}_2 = 100 \%$$

يُعرّف التركيب ذو الصيغة C_mH_n في هذه المعادلة عن كافة الفحم الهيدروجينية باستثناء الميثان CH_4 ، ويقصد بذلك الإيثان C_2H_6 ، البروبان C_3H_8 ، البوتان C_4H_{10} ، الأيثيلين C_2H_4 والاسيتيلين C_2H_2 ... الخ.

الجدول 3.2: تركيب الوقود الغازي، قيمته الحرارية الدنيا LCV، كمية الهواء الصغرى اللازمة للاحتراق A_{\min} ، حجم غازات الاحتراق الرطبة الأصغرى الناتجة، $\text{CO}_{2\max}$.

الوقود الغازي	التركيب المئوي بالـ %						LCV kJ/m³	A_{\min} m³/m³	$V_{\text{C}_{\min}}$ i.N.	$\text{CO}_{2\max}$ كمية حجمية
	CH_4	C_mH_n	H_2	CO	CO_2	N_2				
غاز طبيعي L	82	3	—	—	1	14	31800	8,4	9,4	11,8
غاز طبيعي H	93	2	—	—	1	4	36170	9,8	10,9	12,0
غاز المولدات	2	—	15	27	7	49	5760	1,19	1,98	20,1
غاز فحم الكوك	25	2	55	6	2	10	17370	4,26	4,97	10,1

i.N. تعني عند الشروط النظامية (0 °C، 1.013 bar).

يُحوي الجدول (3.2) بعض المعطيات المتعلقة بالوقود الغازي مثل التركيب، القيمة الحرارية الدنيا.

تُحسب القيمة الحرارية العليا أو الدنيا للوقود الغازي بناءً على مركبات هذا الغاز كما يلي:

$$LCV = \sum r_i LCV_i$$

$$(9.2) \quad HCV = \sum r_i HCV_i \quad [\text{MJ/m}^3] \quad \text{أو:}$$

حيث: r_i حجم الغاز الجزئي (الذي يدخل في تركيب الوقود) $[\text{m}^3 \text{ لكل } \text{m}^3 \text{ وقود غازي جاف}]$

$$LCV_i, HCV_i \text{ القيمة الحرارية الدنيا أو العليا للغاز الجزئي } [\text{MJ/m}^3].$$

تُعطى قيم كل من LCV و HCV لأنواع الوقود في الجدول (4.2).
يستخدم الغاز الطبيعي في محطات الطاقة للإقلاع (تأمين اللهب الأولي) والدعم لشتلات الفحم، كما يستخدم في الصناعات الغازية.

الجدول 4.2: القيمة الحرارية العليا HCV والدنيا LCV لأنواع الوقود الغازي

الغاز	الصيغة الكيميائية	LCV بالـ MJ/m^3	HCV بالـ MJ/m^3
الهيدروجين	H_2	10.81	12.78
أول أكسيد الكربون	CO	12.64	12.64
الميثان	CH_4	35.93	39.87
الاستيلين	C_2H_2	56.9	58.9
الإيثيلين	C_2H_4	59.55	63.5
الإيثان	C_2H_6	64.5	70.45
البروبان	C_3H_8	93	101
البوتان	C_4H_{10}	123.8	134
النفط	C_6H_6	144	150.3
كبريت الهيدروجين	H_2S	28.14	30.3

الجدول (5.2) يعطي درجة حرارة الالتهاب (بدء الاحتراق) لأنواع الوقود الصلب والسائل الغازي.

الجدول 5.2: درجة حرارة الالتهاب (بدء الاحتراق) لأنواع الوقود الصلب والسائل الغازي.

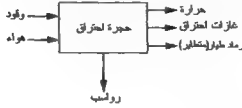
الوقود	درجة حرارة الالتهاب $^{\circ}C$
فحم بني خام	450-230
مسحوق (غبار) الفحم البني	170-150
الفحم الحجري	230-210
الوقود السائل الخفيف	360
الوقود السائل الثقيل	340
الغاز الطبيعي	650-450
الهيدروجين	530

2.2 حساب الاحتراق

1.2.2 العلاقات الستيكومترية (النظرية)

الوقود الصلب والسائل

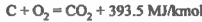
عند الاحتراق في حيز ما تحدث تفاعلات أكسدة للأجزاء القابلة للاحتراق في الوقود مع أكسجين الهواء، والشكل (1.2) يبين الاحتراق بشكل تخطيطي.



الشكل 1.2 : مخطط عملية الاحتراق.

تُعطي العلاقات الستيكومترية (النظرية) معادلات التفاعل من أجل احتراق كامل للوقود وتكون عملية موازنة المواد على أساس المول أو الكتلة.

سنعرض فيما يلي العلاقات الستيكومترية للأجزاء القابلة للاحتراق في وقود صلب أو سائل. من أجل احتراق الكربون



$$(10.2) \quad 12 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 44 \text{ kg}$$

إذاً من أجل 1 kg كربون فإن كمية الأكسجين O_2 اللازمة و CO_2 المرافقة هي:

$$8/3 \text{ kg } O_2, 11/3 \text{ kg } CO_2$$

وبطريقة مشابهة فإنه عند احتراق الهيدروجين ينتج:

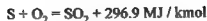


$$(11.2) \quad 2 \text{ kg} + 16 \text{ kg} = 18 \text{ kg}$$

لكل 1 kg من الهيدروجين H_2 يلزم 8 kg من الأكسجين O_2 ، وعند الاحتراق ينشأ 9 kg بخار

ماء H_2O .

عند احتراق الكبريت:



(12.2)

$$32 \text{ kg} + 32 \text{ kg} = 64 \text{ kg}$$

لحرق 1 kg من الكبريت S يلزم 1 kg من الأوكسجين O_2 وينشأ 2 kg من SO_2 .

الوقود الغازي

من أجل احتراق الأجزاء القابلة للاحتراق في وقود غازي (C_mH_n , CH_4 , CO , H_2) تطبق العلاقات الستيكومترية التالية المنسوبة إلى الحجم.

من أجل غاز الهيدروجين:



(13.2)

$$1 \text{ m}^3 + 1/2 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3$$

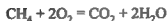
من أجل أوكسيد الكربون:



(14.2)

$$1 \text{ m}^3 + 1/2 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3$$

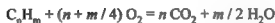
من أجل الميثان:



(15.2)

$$1 \text{ m}^3 + 2 \text{ m}^3 = 1 \text{ m}^3 + 2 \text{ m}^3$$

من أجل الفحم الهيدروجينية عموماً:



(16.3)

$$1 \text{ m}^3 + (n + m / 4) \text{ m}^3 = n \text{ m}^3 + m / 2 \text{ m}^3$$

2.2.2 الهواء اللازم للاحتراق

الهواء اللازم للوقودين في الصلب والسائل

تُحسب كمية الأوكسجين الأصغرية لإحراق الوقود الصلب أو السائل بناءً على العلاقات الستيكومترية (10.2 إلى 12.2) كما يلي:

(17.2)

$$O_{mm} = 8/3 C + 8H + S - O \quad [O_2 \text{ لكل kg وقود}]$$

حيث: C، H، S، O محتوى الوقود من الكربون والهيدروجين والكبريت والأوكسجين

[kg/kg]

يبين الجدول (6.2) تركيب الهواء الجاف، حيث تم إهمال مركبات الهواء الأخرى (ثاني أكسيد الكربون، والغازات الخاملة Ar و Kr)

الجدول 6.2: تركيب الهواء الجاف

المركب	الأكسجين O ₂	الآزوت N ₂	نسبة N ₂ /O ₂
النسبة المولية أو الحجمية	0.21	0.79	3.76
النسبة المئوية للحجم	21.0	79.0	3.76
النسبة المئوية للكتلة	23.2	76.8	3.31

كتلة الهواء النظرية (الأصغرية) اللازمة لاحتراق 1 kg وقود وبالم kg هي:

$$M_{A,min} = 1/0232 (8/3 C + 8 H + S - O) \quad (18.2)$$

$$= 11.49 C + 34.48 H + 4.31 (S - O)$$

الاستهلاك الأصغري للهواء أو كمية الهواء النظرية من أجل الاحتراق الكامل لوقود صلب أو سائل (m³ هواء جاف عند الشروط النظامية أي 0 °C و 1.013 bar لكل 1 kg وقود):

$$A_{min} = 8.88 C + 26.44 H + 33.3 (S - O) \quad (19.3)$$

وبمراعاة رطوبة الهواء x (kg بخار لكل kg هواء جاف) فإن كمية هواء الاحتراق:

$$A'_{min} = A_{min} (1 + 1.6 x) \quad [m^3 \text{ هواء لكل kg وقود}] \quad (20.2)$$

يمكن اعتبار x في الصيف مساوية 0.009 kg / kg وفي الشتاء 0.002 kg / kg.

الهواء اللازم للوقود الغازي

من المعادلات 13.2 حتى 16.2 الستيكومترية، فإن الاستهلاك الأصغري للهواء عند إحراق الوقود الغازي بالم m³ هواء جاف عند الشروط النظامية (0 °C و 1.013 bar) لكل m³ وقود غازي يحسب من العلاقة التالية:

$$A_{min} = 4.76 [0.5 (H_2 + CO) + 2CH_4 + (n + m / 4) C_n H_m + 1.5 H_2 S - O_2] \quad (21.2)$$

حيث: H₂, CO, CH₄, C_nH_m, H₂S, O₂ محتوى الوقود من هذه المركبات [m³/m³].

عامل زيادة الهواء

من أجل احتراق كامل يجب أن يكون هناك زيادة في الهواء.

تبلغ كمية الهواء اللازمة فعلاً للاحتراق:

$$A = \lambda A_{\min} \text{ [m}^3 \text{ لكل m}^3 \text{ أو kg وقود]} \quad (22.2)$$

حيث: λ عامل زيادة (فائض) الهواء.

يتعلق عامل زيادة الهواء بنوع الوقود وطريقة إحراقه. قيم λ هي 1.25 — 1.35 عند الإحراق بالمصبعات (هذا من أجل الحراقات الحديثة، أما من أجل القديمة فقيمة λ هي 1.7). لحراقات الفحم المسحوق تبلغ λ القيمة 1.05 — 1.15، للحراقات السيكلونية 1.1 — 1.25 إذا كان طرح الخبث في الحالة السائلة (مصفوراً)، أما لحراقات الوقود السائل والغازي فتبلغ λ القيمة 1.03 — 1.1.

مثال 1.2

يطلب تحديد القيمة الحرارية الدنيا والاستهلاك الأصغري ثم الفعلي للهواء إذا كانت قيمة عامل زيادة الهواء $\lambda = 1.3$ ، وذلك عن إحراق فحم بنسي تحليله العنصري (كنسبة مئوية وزنية) كما يلي $C = 32$ ، $H = 3$ ، $S = 1$ ، $N = 1$ ، $O = 8$ ، ونسبة الرماد $A = 5$ والماء $W = 50$.

الحل

تنتج القيمة الحرارية الدنيا للوقود بحسب المعادلة (5.2) كما يلي:

$$LCV = 34.8 \times 0.32 + 93.9 \times 0.03 + 10.46$$

$$\times 0.01 + 6.28 \times 0.01 - 10.8 \times 0.8 - 2.50 \times 0.50 = 12 \text{ MJ/kg}$$

أما الاستهلاك الأصغري لهواء الاحتراق فيحسب كما يلي:

$$A_{\min} = 8.88 C + 26.44 H + 3.33 S - 3.33 O$$

$$= 8.88 \times 0.32 + 26.44 \times 0.03 + 3.33 \times 0.01 - 3.33 \times 0.08$$

$$= 3.4 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

والاستهلاك الفعلي لهواء الاحتراق:

$$A = \lambda A_{\min} = 1.3 \times 3.4 = 4.42 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

3.2.2 كمية غازات الاحتراق الناتجة

كمية غازات الاحتراق الناتجة عن الوقود الصلب والسائل

تحسب كتل ثاني أكسيد الكربون CO_2 وثاني أكسيد الكبريت SO_2 الآزوت N_2 عند احتراق كامل لوقود صلب أو سائل من العلاقات الستيكومترية (10.2 إلى 12.2). يحسب حجم

كل عنصر من المركبات الداخلة في تركيب غازات الاحتراق بالاستعانة بالكتلة. تحسب الكتلة النوعية للغازات هذه بمعرفة الكتلة المولية M والحجم المولي V_{Mol} ، ويتضمن الجدول (7.2) الكتلة المولية والكتلة النوعية لمركبات الوقود وغازات الاحتراق.

من أجل الوقود الصلب والسائل تستخدم العلاقات التالية:

$$(23.2) \quad V_{CO_2} = 11 / 3 C \text{ (kg / kg)} \quad \rho_{CO_2} = 1.867 C \text{ [kg لكل وقود]}$$

$$(24.2) \quad V_{SO_2} = 0.68 S \text{ [kg لكل وقود]}$$

$$(25.2) \quad V_{N_2} = 0.8 N + 0.79 A_{min} \text{ [kg لكل وقود]}$$

حيث: C، S، N محتوى الوقود من الكربون والكبريت والأكسجين (كغ لكل كغ وقود).

الجدول 7.2: الكتلة المولية، الحجم المولي، الكتلة النوعية (عند 0°C و 1.013 bar) لمركبات الوقود والهواء وغازات الاحتراق

المركب	الكتلة المولية M Kg/kmol	الحجم المولي V_{Mol} m ³ /kmol	الكتلة النوعية Kg/m ³
الكربون C	12.01	-	-
الكبريت S	32.06	-	-
الأوكسجين O ₂	32.00	22.39	1.429
الأكسجين N ₂	28.16	22.40	1.257
الهيدروجين H ₂	2.016	22.43	0.090
الهواء	28.96	22.40	1.293
ثاني أكسيد الكربون CO ₂	44.01	22.26	1.977
ثاني أكسيد الكبريت SO ₂	64.06	21.86	2.931
بخار الماء	18.02	22.41	0.804

عندما تكون قيمة $\lambda > 1$ فإن غازات الاحتراق تحوي كمية أكبر من الأكسجين والأكسجين:

$$(26.2) \quad V_{N_2} = 0.8 N + 0.79 \lambda A_{min} \text{ [kg لكل 1 kg وقود]}$$

$$(27.2) \quad V_{O_2} = 0.21 (\lambda - 1) A_{min} \text{ [kg لكل 1 kg وقود]}$$

تحتسب كمية غازات الاحتراق الجافة الناتجة عن الاحتراق كما يلي:

$$(28.2) \quad V_{G, dry} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1.867 C + 0.68 S + 0.8 N + 0.79 \lambda A_{min} + 0.21 (\lambda - 1) A_{min} \text{ [m}^3/\text{kg]}$$

بسبب احتراق الهيدروجين (H) الموجود في الوقود، وبسبب الماء الموجود فيه أيضاً (W) فإن كمية بخار الماء التي توجد في غازات الاحتراق تحسب كما يلي:

$$(29.2) \quad V_{H_2O} = 11.11 H + 1.24 W \quad [\text{m}^3 \text{ بخار ماء لكل kg وقود}]$$

وبمراعاة رطوبة الهواء x (كغ لكل كغ هواء جاف) يصبح:

$$(30.2) \quad V_{H_2O} = 11.11 H + 1.24 W + 1.6 \times \lambda A_{\min} \quad [\text{m}^3 \text{ بخار ماء لكل kg وقود}]$$

أما كمية غازات الاحتراق الرطبة فتحسب من العلاقة:

$$(31.2) \quad V_G = V_{G, \text{dry}} + V_{H_2O} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

كمية غازات الاحتراق الفعلية بعد مراعاة الكمية الصغرى $V_{G, \min}$ عند احتراق سيتكومتري ($\lambda = 1$) عامل زيادة الهواء λ هي:

$$(32.2) \quad V_G = V_{G, \min} + (\lambda - 1) A_{\min}$$

عندما يكون الاحتراق غير كامل بفعل قلة الهواء ينشأ لدى احتراق الكربون إلى جانب ثاني أكسيد الكربون CO_2 ينشأ أيضاً أول أكسيد الكربون CO



$$(33.3) \quad 12 \text{ Kg} + 16 \text{ kg} = 28 \text{ kg}$$

مثال 2.2

من أجل فحم بنسي تركيبه العنصري كما يلي: C = 32 %، H = 3 %، S = 1 %، N = 1 %، O = 8 % الرماد A = 5 %، الماء W = 50 %، يطلب تحديد كميات الغازات الناتجة عن الاحتراق والكمية الإجمالية الجافة والرطبة. استعمل معطيات المثال 1.2.

الحل

كمية الغازات التي تتألف منها غازات الاحتراق عندما تكون $\lambda = 1.3$:

$$V_{\text{CO}_2} = 1.867 C = 0.592 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{SO}_2} = 0.68 S = 0.007 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{\text{N}_2} = 0.8 N + 0.79 \lambda A_{\min}$$

$$= 0.8 \times 0.01 + 0.79 \times 1.3 \times 3.34 = 3.5 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{O_2} = 0.21 (\lambda - 1) A_{\min}$$

$$= 0.21 (1.3 - 1) = 0.214 \text{ m}^3/\text{kg}$$

الكمية الإجمالية للغازات الجافة:

$$V_{G,dy} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}$$

$$= 0.592 + 0.007 + 3.5 + 0.214 = 4.313 \text{ m}^3/\text{kg}$$

بمراعاة رطوبة الهواء x (حوالي 0.01 kg/kg) تصبح كمية بخار الماء:

$$V_{H_2O} = 11.11 H + 1.24 W + 1.6 x A$$

$$= 11.11 \times 0.03 + 1.24 \times 0.50 + 1.6 \times 0.01 \times 4.42$$

$$= 0.333 + 0.62 + 0.068 = 1.021 \text{ m}^3/\text{kg}$$

وتصبح كمية غازات الاحتراق الإجمالية الرطبة:

$$V_G = V_{G,dy} + V_{H_2O}$$

$$= 4.313 + 1.021 = 5.334 \text{ m}^3/\text{kg}$$

مثال 3.2

وقود سائل ثقيل تركيبه كما يلي (C = 86 % وزناً، H = 13 %، S = 0.3 %، N = 0.4 %). يُطلب حساب حجم الهواء الأصغري اللازم للاحتراق، وكذلك حجم غازات الاحتراق الناتجة عندما تكون $\lambda = 1.1$. محتوى الهواء من الرطوبة x يبلغ 0.009 kg هواء لكل kg هواء جاف.

الحل:

1. حجم الهواء الأصغري اللازم للاحتراق:

$$A_{\min} = 8.88 C + 26.44 H + 3.33 (S - O)$$

$$= 8.88 \times 0.86 + 26.44 \times 0.13 + 3.33 (0.003 - 0.003) = 11.07 \text{ m}^3/\text{kg}$$

2. الحجم الفعلي للهواء اللازم:

$$A = \lambda A_{\min} = 1.1 \times 11.07 = 12.18 \text{ m}^3/\text{kg}$$

3. حجم غازات الاحتراق الناتجة عندما $\lambda = 1.1$ تحسب كما يلي:

$$V_{CO_2} = 1.867 C = 1.867 \times 0.86 = 1.606 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{SO_2} = 0.68 S = 0.68 \times 0.003 = 0.002 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{N_2} = 0.8 N_2 + 0.79 A$$

$$= 0.8 \times 0.004 + 0.79 \times 12.18 = 9.626 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{O_2} = 0.21 (\lambda - 1) A_{\min}$$

$$= 0.21 (1.1 - 1) 11.07 = 0.256 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$V_{H_2O} = 11.11 H + 1.6 x A$$

$$= 11.11 \times 0.13 + 1.6 \times 0.009 \times 12.18 = 1.62 \text{ m}^3/\text{kg}$$

4. الحجم الإجمالي لغازات الاحتراق الرطبة هو مجموع أحجام الغازات الجزئية:

$$V_G = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O}$$

$$= 1.606 + 0.002 + 9.626 + 0.256 + 1.62 = 13.109 \text{ m}^3/\text{kg}$$

كمية غازات الاحتراق الناتجة عن احتراق الوقود الغازي

عند حصول احتراق كامل لوقود غازي خالٍ من الكبريت (عندما $\lambda > 1$) تنشأ الأحجام التالية

من غازات الاحتراق (بالـ m^3 لكل m^3 وقود غازي عند الشروط النظامية):

$$(34.2) \quad V_{CO_2} = CO_2 + CO + CH_4 + n C_n H_m$$

$$(35.2) \quad V_{N_2} = N_2 + 0.79 \lambda A_{\min}$$

$$(36.2) \quad V_{O_2} = 0.21 (\lambda - 1) A_{\min}$$

حيث: CO_2 ، CO ، CH_4 ، $C_n H_m$ ، محتوى الوقود الغازي من هذه المركبات [بالـ m^3 لكل m^3

وقود غازي عند الشروط النظامية]

A_{\min} الاستهلاك الأصغري للهواء من أجل الاحتراق [m^3 لكل m^3 وقود غازي]

x محتوى الرطوبة في الهواء [كغ لكل كغ هواء جاف]

λ عامل زيادة الهواء.

حجم غازات الاحتراق الجافة عند احتراق كامل:

$$(37.2) \quad V_{G, dry} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

حجم بخار الماء عند مراعاة رطوبة الهواء:

$$(38.2) \quad V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + m/2 C_n H_m \quad [\text{m}^3 \text{ وقود غازي } \text{m}^3 \text{ H}_2\text{O}]$$

أو:

$$(39.2) \quad V_{H_2O} = H_2 + 2CH_4 + m/2 C_n H_m + 1.6 x \lambda A_{\min} \quad [\text{m}^3/\text{m}^3]$$

أما حجم غازات الاحتراق الرطبة الإجمالية V_G فهو مجموع غازات الاحتراق الجافة $V_{G,dry}$ وبخار الماء V_{H_2O} .

4.2 مثال

غاز طبيعي تركيبه كما يلي (كسب حجمية) $CH_4 = 93\%$ ، $C_2H_6 = 2\%$ ، $C_3H_8 = 3\%$ ، $CO_2 = 1\%$ ، $N_2 = 1\%$ ، يُطلب حساب استهلاك الهواء وكذلك حجم غازات الاحتراق الناتجة عندما $\lambda = 1.1$. رطوبة الهواء: $x = 0.009 \text{ kg}$ لكل kg هواء جاف.

الحل

1. يُحسب الحجم الأصغري للهواء اللازم للاحتراق من المعادلة (21.2) كما يلي:

$$\begin{aligned} A_{\min} &= 4.76 [2 CH_4 + (n + m / 4) C_n H_m] \\ &= 4.76 [2 CH_4 + (2 + 6/4) C_2 H_6 + (3 + 8/4) C_3 H_8] \\ &= 4.76 [2 \times 0.93 + 3.5 \times 0.02 + 5 \times 0.03] = 9.9 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

2. الاستهلاك الفعلي للهواء:

$$A = \lambda A_{\min} = 1.1 \times 9.9 = 10.89 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

3. حجم غازات الاحتراق عندما $\lambda = 1.1$

$$\begin{aligned} V_{CO_2} &= CO_2 + CH_4 + 2 C_2 H_6 + 3 C_3 H_8 \\ &= 0.01 + 0.93 + 2 \times 0.02 + 3 \times 0.03 = 1.07 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{N_2} &= N_2 + 0.79 A \\ &= 0.01 + 0.79 \times 10.89 = 8.61 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{O_2} &= 0.21 (\lambda - 1) A_{\min} \\ &= 0.21 (1.1 - 1) 9.9 = 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= 2 CH_4 + 6/2 C_2 H_6 + 8/2 C_3 H_8 + 1.6 x A \\ &= 2 \times 0.93 + 3 \times 0.02 + 4 \times 0.03 + 1.6 \times 0.009 \times 10.89 = 2.20 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

4. حجم غازات الاحتراق الرطبة هي مجموع الغازات السابقة

$$\begin{aligned} V_G &= V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} + V_{H_2O} \\ &= 1.07 + 8.61 + 0.21 + 2.20 = 12.09 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

الحجم الجزئي والضغط الجزئي لمركبات غازات الاحتراق

تُحسب نسبة الحجم الجزئي لمركبات غازات الاحتراق (CO_2 , H_2O , N_2 , O_2 , SO_2 وأحياناً CO) من حجم كلٍ منها والحجم الإجمالي V_G للغازات الرطبة (بالـ m^3 لكل m^3 من الوقود الغازي عند الشروط النظامية أي 0°C و 1.013 bar)

$$(40.2) \quad r = V / V_G$$

إن مجموع نسب الحجوم الجزئية للمركبات الداخلة في تركيب غازات الاحتراق يساوي الواحد.

ويُنتج الضغط الجزئي p_i لأحد مركبات غازات الاحتراق من نسبة الحجم الجزئي r والضغط الكلي للغازات.

$$(41.2) \quad p_i = r_i p \quad [\text{Pa}]$$

وبموجب قانون دالتون فإن مجموع الضغوط الجزئية للمركبات الداخلة في تركيب غازات الاحتراق يساوي الضغط الكلي:

$$(42.2) \quad \sum p_i = p$$

تستخدم الضغوط الجزئية لثاني أكسيد الكربون وبخار الماء في حساب انتقال الحرارة بالإشعاع في حجرة الاحتراق وسطح التبادل الحراري لمولد البخار.

مثال 5.2

للفاز الطبيعي الوارد في المثال 4.2 يطلب حساب الحجوم الجزئية والضغوط الجزئية لمركبات غازات الاحتراق. الضغط الكلي في حجرة الاحتراق: $p = 1 \text{ bar}$.

الحل

1. من المثال 4.2 نجد حجم غازات الاحتراق المختلفة وحجم الغازات الرطبة الإجمالية:

$$V_{\text{CO}_2} = 1.07 \text{ m}^3/\text{m}^3, V_{\text{N}_2} = 8.61 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$V_{\text{O}_2} = 0.21 \text{ m}^3/\text{m}^3, V_{\text{H}_2\text{O}} = 2.20 \text{ m}^3/\text{m}^3, V_G = 12.09 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

2. الحجم الجزئي لـ CO_2 في الغازات الرطبة (على سبيل المثال):

$$\begin{aligned} r_{\text{CO}_2} &= V_{\text{CO}_2} / V_G \\ &= 1.07 / 12.09 \approx 0.111 \text{ m}^3/\text{m}^3 \end{aligned}$$

والضغط الجزئي لـ CO_2

$$P_{\text{CO}_2} = p r_{\text{CO}_2} = 1 \times 0.111 = 0.111 \text{ bar}$$

3. تحسب بطريقة مشابهة للمركبات الأخرى لغازات الاحتراق، والجدول 8.2 يعطي المعطيات والناتج.

الجدول 8.2: المعطيات والناتج للمثال 5.2

مركبات الغاز الطبيعي	الحجم بالـ m^3/m^3	نسبة الحجم الجزئي r_i بالـ m^3/m^3	الضغط الجزئي p_i بالـ bar
CO_2	1.07	0.111	0.111
N_2	8.61	0.690	0.690
O_2	0.21	0.017	1.017
H_2O	2.20	0.182	0.182
المجموع	12.09	1.000	1.000

القيم المميزة والانتالبي لغازات الاحتراق

تُحسب الكتلة النوعية لغازات الاحتراق (بالـ kg/m^3 عند الشروط النظامية) كما يلي:

$$(43.2) \quad \rho_G = \sum r_i \rho_i = 1.977 r_{\text{CO}_2} + 0.804 r_{\text{H}_2\text{O}} + 2.931 r_{\text{SO}_2} + 1.257 r_{\text{N}_2} + 1.429 r_{\text{O}_2} + 1.25 r_{\text{CO}}$$

حيث: r_i الحجم الجزئي للمركب i من غازات الاحتراق $[\text{m}^3/\text{m}^3]$

ρ_i الكتلة النوعية للمركب i من غازات الاحتراق $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

تزداد قيمة الكتل النوعية ρ_G كلما ازداد محتوى الغازات من CO_2 و SO_2 وتقل قيمة ρ_G بازدياد محتوى الغازات من H_2O .

تُحسب السعة الحرارية النوعية الوسطية لغازات الاحتراق بثبوت الضغط من العلاقة:

$$(44.2) \quad c_{pG} = \sum g_i c_{pi} \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

حيث: g_i النسبة الكتلية للمركب i في غازات الاحتراق $[\text{kJ}/\text{kg}]$

c_{pi} السعة الحرارية النوعية الوسطية للمركب i من الغازات عند ثبوت الضغط $[\text{kJ}/\text{kg}]$

(الجدول 9.2).

يحسب الانتالبي لغازات الاحتراق h_G عند درجة حرارة معينة t كما يلي:

$$h_G = V_G c_{pG} t \quad [\text{kJ لكل kg}^3 \text{ أو m}^3 \text{ وقود}] \quad (45.2)$$

الجدول 9.2: السعة الحرارية الوسطية النوعية c_p للغازات [kJ/kgK] في مجال درجات الحرارة بين 0 و 1000°C

SO ₂	H ₂ O	CO ₂	O ₂	N ₂	الهواء	درجة الحرارة بالـ °C
0.6083	1.8591	0.8165	0.9148	1.0394	1.0037	0
0.6365	1.8724	0.8677	0.9230	1.0404	1.0065	100
0.6634	1.8931	0.9122	0.9355	1.0434	1.0117	200
0.6877	1.9185	0.9509	0.9500	1.0490	1.0192	300
0.7090	1.9467	0.9850	0.9649	1.0568	1.0286	400
0.7274	1.9767	1.0152	0.9792	1.0661	1.0389	500
0.7433	2.0082	1.0422	0.9925	1.0764	1.0498	600
0.7692	2.0741	1.0881	1.0158	1.0976	1.0712	800
0.7891	2.1414	1.1253	1.0350	1.1179	1.0910	1000
0.8049	2.2078	1.1560	1.0512	1.1363	1.1087	1200
0.8178	2.2714	1.1816	1.0651	1.1528	1.1243	1400
0.8286	2.3311	1.2032	1.0775	1.1673	1.1382	1600
0.8377	2.3866	1.2217	1.0888	1.1801	1.1505	1800
0.8457	2.4379	1.2377	1.0993	1.1914	1.1615	2000
0.8527	2.4851	1.2517	1.1092	1.2015	1.1714	2200

أما عامل التوصيل الحراري λ_G للغازات الاحتراق فيحسب من المعادلة التقريبية التالية:

$$\lambda_G = \sum g_i \lambda_i \quad [\text{W/mK}] \quad (46.2)$$

حيث: g_i الكتلة الجزئية للمركب i من غازات الاحتراق [kg/kg]

λ_i عامل التوصيل الحراري للمركب i من غازات الاحتراق [W/mK].

يمكن أخذ قيم λ_i من الجدول 10.2.

الجدول 10.2: عامل التوصيل الحراري λ [W/mK] للغازات عند 1 bar.

SO ₂	H ₂ O	CO ₂	O ₂	N ₂	الهواء	درجة الحرارة بالـ °C
0.0084	0.0182	0.0143	0.0246	0.0243	0.0243	0
-	0.0248	0.0213	0.0317	0.0304	0.0314	100
-	0.0431	0.0286	0.0407	0.0383	0.0386	200
-	-	0.0352	0.0476	0.0442	0.0454	300

هناك علاقة بين الكتل الجزئية g_i [kg/kg] والضغط الجزئي p_i [m³/m³] لمركبات غازات

الاحتراق وهي:

(47.2)

$$g_i = m_i / m = V_i \rho_i / V \rho = r_i M_i / M$$

حيث: m_i أو m كتلة المركب i من غازات الاحتراق أو كتلة غاز الاحتراق [kg]

V_i أو V حجم المركب i من غازات الاحتراق أو حجم غاز الاحتراق [m^3]

ρ أو ρ_i الكتلة النوعية للمركب i من غازات الاحتراق أو الكتلة النوعية لغازات الاحتراق [kg/m^3]

M_i أو M الكتلة المولية لـ i من غازات الاحتراق أو الكتلة المولية لغازات الاحتراق بمجمليها [kg/kmol]

تُحسب قيمة الانتالبي لغازات الاحتراق في مجال درجات الحرارة بين 0 °C والدرجة t كما يلي:
من أجل 1 kg وقود صلب أو سائل أو 1 m^3 وقود غازي تُطبق العلاقة التالية:

(48.2)

$$H_G = V_G c_{pG} t \quad [m^3 \text{ أو } kg/kJ]$$

حيث: V_G حجم غازات الاحتراق [m^3 لكل 1 kg أو 1 m^3 وقود]

c_{pG} السعة الحرارية الوسطية النوعية لغازات الاحتراق [kJ/m^3K].

3.2 درجة حرارة الاحتراق

تُحدد درجة حرارة الاحتراق ودرجة حرارة غازات الاحتراق عند مخرج حجرة الاحتراق عن طريق الانتالبي بناءً على الموازنة الحرارية لمحجرة الاحتراق:

(49.2)

$$m_F = (L_{CV} + c_F t_F + A \rho_A c_{pA} t_A) = m_F h_G \quad [kJ/S]$$

(50.2)

$$m_F h_G = Q_{FR} + Q_L \quad [kJ/s]$$

حيث: m_F تدفق الوقود الصلب والسائل [kg/s] أو الوقود الغازي [m^3/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg] أو [kJ/m^3]

A استهلاك الهواء [m^3/kg أو m^3/m^3 للوقود الغازي]

ρ_A الكتلة النوعية للهواء [kg/m^3]

C_F أو C_{pA} السعة الحرارية النوعية للوقود أو الهواء [kJ/kgK]

t_F أو t_A درجة حرارة الوقود أو الهواء [°C]

h_G الانتالبي النوعي لغازات الاحتراق [kJ/s]

Q_{FR} التيار الحراري المفقود في حجرة الاحتراق [kJ/s]

عندما يكون الاحتراق كاملاً وبدون ضياعات للطاقة ($Q_L = 0$) وبدون تبادل حراري ($Q_{FR} = 0$) تنتج درجة حرارة الاحتراق النظرية (الأدياباتية أو الكظيمة) t_{th} . إذا أهملت الحرارة المحسوسة للوقود والهواء يصبح:

$$(51.2) \quad t_{th} = LCV / V_G r_G C_{PG} = h_G / C_{PG}$$

يمكن تحديد حرارة حجرة الاحتراق الفعلية t_{FR} بشكل تقريبي كما يلي:

$$(52.2) \quad t_{FR} = \phi \ t_{th}$$

حيث: ϕ عامل تخفيض يراعي التبادل الحراري من حجرة الاحتراق، وهو يتعلق بطريقة احتراق الوقود (نوع الحرق).

عند درجات حرارة تفوق الـ 1500 °C يحدث تفكك لـ CO_2 و H_2O وتستهلك لهذا حرارة بحيث تصبح درجة الحرارة في حجرة الاحتراق أقل، وهذا الأمر يعقد حساب درجة حرارة الاحتراق.

في الجدول (11.2) توجد قيم استرشادية لدرجة حرارة الاحتراق النظرية t_{th} ولدرجة حرارة حجرة الاحتراق t_{FR} .

الجدول 11.2: درجة الحرارة النظرية t_{th} لمختلف أنواع الوقود، ودرجة حرارة حجرة الاحتراق t_{FR} لمختلف أنواع الوقود.

t_{FR} بالـ °C	t_{th} بالـ °C
1500 - 1200 لخرافات مسحوق الفحم الحجري	2300 - 2200 الفحم الحجري
لخرافات الفحم الحجري مع تصريف الخبث بالحالة المصهورة 1800 - 1400	
لخرافات مسحوق الفحم البني 1150 - 1000	1500 - 1400 الفحم البني
مسحوق الفحم البني في فرشة الوقود السائل 900 - 800	
لخرافات الوقود السائل 1600 - 1200	الوقود السائل الثقيل والخفيف 2100 - 2000
لخرافات الوقود الغازي 1600 - 1200	الغاز الطبيعي حوالي 2000

4.2 اختبار جودة الاحتراق

لاختبار جودة الاحتراق تجرى عملية تحليل لغازات الاحتراق ويُحدّد المحتوى من الأكسجين (O_2) وثنائي أكسيد الكربون (CO_2) في غازات الاحتراق الجافة. إن تحديد نسبة CO_2 في غازات الاحتراق معيار هام في تحديد جودة الاحتراق.

عند احتراق كامل للوقود بدون عامل زيادة هواء $\lambda = 1$ تصل قيمة محتوى CO_2 في الغازات إلى حدّها الأعظمي CO_{2max} .

من أجل الوقود الصلب والسائل [كنسب حجمية]:

$$CO_{2max} = 1.867 C / V_G \quad (53.2)$$

حيث: C محتوى الوقود من الكربون [kJ/kg]

V_G حجم غازات الاحتراق [m^3/kg].

عندما تكون قيمة $C = 1$ ، أي من أجل الفحم الصافي تصبح قيمة $CO_{2max} = 21\%$ [حجماً].

يعطي الجدول (12.2) قيم CO_{2max} لأنواع مختلفة من الوقود على سبيل المثال.

الجدول 12.2: قيم CO_{2max} لأنواع مختلفة من الوقود

نوع الوقود	CO_{2max} كنسبة حجمية مئوية
فحم حجري وبني	18.6 – 19.8
– غني بالكربون	18 – 7
– فقير بالكربون	19.1
– انتراسيت	19.2
فحم الكوك	20.6
وقود سائل (فيول أويل)	15.5 – 16.0
غاز طبيعي	12.5

من قيمة CO_2 المقاسة و CO_{2max} تنتج قيمة محتوى غازات الاحتراق من الأكسجين (O_2):

$$O_2 = 21 (1 - CO_2 / CO_{2max}) \quad \text{[كنسبة حجمية]} \quad (54.2)$$

وبحسب عامل زيادة الهواء λ بشكل تقريبي كما يلي:

$$\lambda = CO_{2max} / CO_2 \quad (55.2)$$

إذا أُجري تحليل لغازات الاحتراق وتمَّ قياس محتوى الغازات من O_2 فإن عامل زيادة الهواء يكون:

$$\lambda = 21 / (21 - O_2) \quad (56.2)$$

درجة حرارة تكاثف غازات الاحتراق

درجة حرارة التكاثف هي حرارة الإشباع لبخار الماء عند ضغطه الجزئي، ويمكن قراءتها مباشرة من جدول البخار. إذا انخفضت درجة حرارة غازات الاحتراق إلى ما دون درجة حرارة التكاثف، عندها يحدث تكاثف لبخار الماء الموجود في غازات الاحتراق، ومع SO_2 و SO_3 تنشأ الحموض H_2SO_4 و H_2SO_3 التي تؤدي إلى تآكل (صدأ) سطوح التسخين كالموهر، ومسخن الهواء الأولي. تخافياً لهذا الصدأ يجب أن تبقى درجة حرارة غازات الاحتراق أعلى من درجة حرارة التكاثف.

مثال 6.2

من أجل فحم بني له $CO_{2max} = 19.8\%$ تبيّن أن محتوى CO_2 في غازات الاحتراق 15.2% . ما هو محتوى غازات الاحتراق من الـ O_2 ؟ وما هي قيمة عامل زيادة الهواء؟

الحل

1. محتوى غازات الاحتراق من الأكسجين O_2

$$O_2 = 21 (1 - 15.2 / 19.8) = 4.6\%$$

2. عامل زيادة الهواء

$$\lambda = 19.8 / 15.2 = 1.3$$

مثال 7.2

من أجل غازات الاحتراق التي تركيبها كما ورد في المثال 5.2 يُطلب تحديد درجة حرارة تكاثف هذه الغازات. الضغط الجزئي لبخار الماء فيها 0.182 bar .

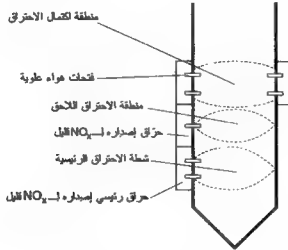
الحل

من جدول بخار الماء وعند الضغط الجزئي 0.182 bar نجد أن درجة حرارة إشباع البخار هي 57.9°C ، وبالتالي فإن درجة حرارة تكاثف غازات الاحتراق هي $t = 57.9^\circ\text{C}$.

5.2 الاحتراق ذو الإصدار القليل للغازات الضارة

لتقليل إصدار غازات NO_2 تُراعى إجراءات الاحتراق التالية:

- تخفيض درجة حرارة الاحتراق.
- تخفيض تركيز الأوكسجين في منطقة درجة الحرارة المرتفعة من حجرة الاحتراق.
- الإحراق على مراحل عن طريق:
 - إضافة الهواء على مراحل (هواء أولي - ثانوي - مرحلة ثالثة) في الحراق وفي حجرة الاحتراق
 - إضافة الوقود على مراحل
- إنقاص عامل زيادة الهواء.
- إعادة تمرير غازات الاحتراق على حجرة الاحتراق لتخفيض درجة حرارتها (الحجرة) ولتخفيض تركيز الأوكسجين فيها.



الشكل 2.2 : الاحتراق على مراحل في حجرة احتراق مولد البخار.

يبين الشكل (2.2) بشكل تخطيطي الاحتراق على مراحل، وفي الشكل (3.2) هناك حراق لمسحوق الفحم ذو إضافة للهواء على مراحل يحقق احتراقاً تكون الغازات الضارة الناتجة عنه قليلة. عند استخدام حراقات فحم مسحوق تطلق قدرأ صغيراً من NO_x ينخفض إصدار NO_x ليصبح 400 حتى 800 mg NO_2 لكل 1 m³ من غازات الاحتراق، ويمكن تخفيض الإصدار حتى يصبح بين 200 و 400 mg لكل 1 m³ من غازات الاحتراق.



الشكل 3.2 : حرق مسحوق فحم ذو إضافة للهواء على مراحل.

إذا استخدم أسلوب الاحتراق على مراحل وتم تمرير غازات الاحتراق ثانية (إعادة تدويرها) إلى حجرة الاحتراق يحدث الاحتراق في فرشاة الوقود السائلة عند درجات حرارة منخفضة تصل إلى 850 °C، وهذا مناسب لتقليل إصدار كل من أكاسيد الآزوت والكبريت.

في حراقات فرشاة الوقود السائلة ينخفض إصدار NO_2 ليتراوح بين 100 و 300 mg لكل m^3 من غازات الاحتراق، وسيعالج في الفصل الرابع بشكل مفصل الاحتراق في فرشاة الوقود السائلة الرفيق بالبيئة. أما تقليل إصدار الغازات الضارة في محطات الطاقة البخارية والغازية والمشاركة فسيجري عرضه في الفصول الرابع والسادس والسابع والثامن.

3 المحطات البخارية

1.3 أنواع محطات الطاقة

تقسم محطات الطاقة وفقاً لنوع الطاقة الأولية المستخدمة إلى:

- المحطات الحرارية (العنفات البخارية والغازية)
- المحطات المائية (الماء الجاري، ماء الخزانات أو السدود ومحطات تخزين الماء بالضخ)
- المحطات النووية
- المحطات الشمسية (المزارع الشمسية، الأبراج الشمسية، المعدات الكهروضوئية - الفوتوثنولطية - أي ذات الخلايا الشمسية)
- محطات الرياح
- المحطات الجيوحرارية (الطاقة الحرارية لباطن الأرض)
- محطات قوة المدّ والجزر

تبلغ الاستطاعة التي تقدمها محطات الطاقة في العالم حالياً ما يزيد على 2000 GW^{*} حوالي 70% منها يُولّد بالوقود المستحاثي: أكبر استطاعة تقدمها محطة منفردة (وحدة توليد واحدة) تتراوح بين 700 و 1000 MW عند استخدام الوقود المستحاثي و 1300 MW في المحطات النووية و 280 MW للمحطات التي تعمل بالعنفات الغازية و 80 MW للمحطات الشمسية و 2 إلى 3 MW في محطات الرياح و 500 MW في المحطات المائية.

أما أكبر محطة طاقة تستخدم الفحم فهي في جنوب أفريقيا (محطة Kendal) واستطاعتها الكهربائية تبلغ 4116 MW وفيها 6 عنفات بخارية استطاعة كل منها 686 MW.

^{*} في عام 1997 - لترجم.

إن مقياس جودة محطة طاقة ما هو مردودها الكهربائي الذي هو نسبة استطاعتها الكهربائية إلى الطاقة الأولية المستخدمة في واحدة الزمن، والقيم السائدة للاستطاعات والمردود في مختلف أنواع محطات الطاقة معطاة في الجدول 1.3.

الجدول 1.3: المردود النمطية لمحطات الطاقة

نوع محطة الطاقة	الاستطاعة الكهربائية MW	المردود الكهربائي %
المحطات المائية	500-10	90-85
محطات الدارة المركبة (غازي+بخاري)	300-100	58-51
المحطات البخارية	700-100	42-35
محطات التدفئة التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي أو العنفات الغازية	20-0.05	40-32
المحطات ذات العنفات الغازية	250-10	39.5-34
المحطات النووية	1300-500	37-33
محطات الرياح	3-0.01	30-20
المحطات الشمسية	القيمة الأعظمية 80	14-10
المحطات الفوتوفولطية ذات الخلايا الشمسية باستخدام خلايا السيليسيوم	القيمة الأعظمية 6.5	حوالي 10

أما مجموع الاستطاعات التي تقدمها محطات ألمانيا فقد بلغ عام 1990 القيمة 125.4 GW، ومن الطاقة الكهربائية المنتجة التي بلغت 380 TWh/a (في نفس العام) فإن 73 % أنتج باستخدام الوقود المستحاثي و19 % بالطاقة النووية و8 % عن طريق المحطات المائية.

تقسم محطات الطاقة الحرارية (التي تستخدم وقوداً مستحاثياً) إلى:

— محطات بخارية ذات عنفات تكثيف (فقط لتوليد الكهرباء).
— محطات طاقة كهربائية وحرارية ذات عنفات لتمدد البخار المتكاثف أو عنفات ذات ضغط معاكس.

— محطات طاقة كهربائية وحرارية تستخدم محركات الاحتراق أو العنفات الغازية.

— محطات ذات عنفات غازية.

— محطات دائرة مركبة (تحوي عنفات غازية وبخارية).

— محطات تستخدم محركات الديزل.

تنسب التكاليف الاستثمارية إلى واحدة الاستطاعة 1 kW كاستطاعة وإلى 1 kWh كعمل. وفي الجدولين (2.3) و(3.3) نجد الكلفة النسبية للاستثمار وللوقود وكذلك السطح والحجم اللازمين لمختلف أنواع محطات الطاقة، وقد أخذت القيمتان 2500 DM/kW* و 0.03 DM/kWh وأسعار عام 1985 من أجل محطات إحراق الفحم الحجري كقيم مرجعية.

الجدول 2.3: التكاليف الاستثمارية وتكاليف الوقود النسبية لأنواع مختلفة من محطات التوليد

نوع المحطة	الكلفة النسبية للاستثمار [%]	الكلفة النسبية للوقود [%]
محطة تحرق الفحم الحجري	100	100
محطة تحرق الفحم البني	120	130
محطة ذات عنفة غازية	40	300

الجدول 3.3: المساحة والحجم اللازمان (دون المنشآت المساعدة) منسوبة إلى 1 kW من استطاعة المحطة

الوقود	المساحة اللازمة [m ² /kW]	الحجم اللازم [m ³ /kW]
الفحم الحجري	17.5	750
الفحم البني	19.5	1100
الوقود السائل (الفيول أويل)	7.9	4.20

أما الجدول (4.3) فيعطي الطاقة المستهلكة لبناء مختلف محطات الطاقة .

الجدول 4.3: الطاقة المستهلكة لإنشاء المحطات المختلفة (بحسوبة بـ kWh لكل 1kW من الاستطاعة الكهربائية).

نوع المحطة	[MW] P_{el}	[kWh/kW] $E_{building}$
محطات بخارية	700-10	1.1-0.5
محطات العنفات الغازية	240-1	0.5-0.2
محطات الدارة المركبة (بخارية+غازية)	1000-70	1.1-0.8
محطات التدفئة	20-0.05	1.3-0.8
المحطات المائية	100-5	0.4-0.2
المحطات الشمسية	80-1	10-5
المحطات النووية	1300-700	4-1.3

* DM تعني المارك الألماني — للترجم.

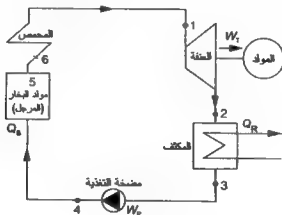
وبحسب نوع الاستعمال نميز بين الحمولة الأساسية (base load) والحمولة المتوسطة وحمولة الذروة للمحطة (Peak load).

تعمل محطات الحمولة الأساسية ما يعادل أكثر من 5000 ساعة في العام من الحمولة الاسمية، وهذا يعني حوالي 50 % من حوالتها الإجمالية. وهي تعمل في ألمانيا على الفحم البني والطاقة النووية وعلى المياه الجارية. أما محطات الحمولة للمتوسطة فيكون استهلاكها 2000 إلى 5000 ساعة في العام، وهو ما يعادل حوالي 30 % من حوالتها الإجمالية وتعمل على الفحم الحجري. وفي محطات الذروة يستخدم الوقود السائل (الفيول أويل) والغاز الطبيعي، ويعتمد على العنفات الغازية وعلى المحطات ذات مضخات التخزين لتفطية حمولة الذروة. توجد في الوقت الحاضر منشآت دارة مركبة تستخدم فيها العنفات الغازية من أجل الحمولة الأساسية

2.3 التصميم الأساسي للمحطات البخارية (تركيبها وأجزاؤها)

التصميم الأساسي للمحطة البخارية

الأجزاء الأساسية للمحطة البخارية هي: مولد البخار، المحمّص، العنف البخارية والمولد الكهربائي، المكثف ومضخة مياه التغذية كما هو مبين في الشكل (1.3).



الشكل 1.3 : مخطط أجزاء المحطة البخارية.

يتم في مولد البخار تسخين وسيط العمل الذي هو الماء من درجة الحرارة الابتدائية (النقطة 4) إلى درجة حرارة الإشباع ثم تبخره، ويحدث هذا عند ضغط ثابت p_1 . يجري في المحمّص تسخين إضافي للبخار المشبع من درجة حرارة الإشباع إلى درجة حرارة البخار الطازج. في العنف البخارية

يتمدد البخار الطازج (من النقطة 1) بلون تبادل حراري مع الوسط الخارجي وبهذا ينخفض الضغط من p_1 إلى p_2 وينتقل البخار من العنفة إلى المكثف حيث يتم فيه تكاثف البخار عند ضغط ثابت وذلك بإعطاء الحرارة إلى ماء التبريد. ينتقل الماء المتكاثف (ماء يغلي ضغطه p_2) بواسطة مضخة التغذية إلى مولد البخار فترتفع الضغط من p_2 إلى p_1 .

تحليل عملية البخار البسيطة

تعمل المحطة البخارية وفقاً لدورة كلاوزيوس — رانكين للبيئة في الشكل (2.3) على المحاور T,s و h,s, p,v.

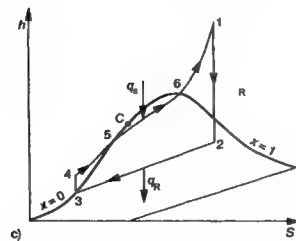
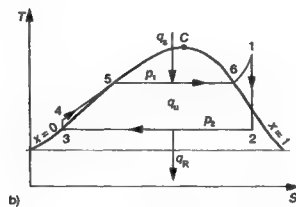
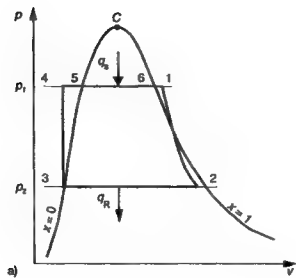
سنعرض لاحقاً التحليل الترموديناميكي لهذه الدورة، حيث تجري في دورة كلاوزيوس — رانكين العمليات التالية:

- تمدد ايزونتروبي (بثوت s) للبخار في العنفة (1 - 2)،
- تكاثف البخار في المكثف (2 - 3) عند ضغط ثابت p_2 ودرجة حرارة ثابتة t_2 ،
- انضغاط ايزونتروبي للماء في مضخة مياه التغذية (3 - 4)،
- إضافة للحرارة بثوت الضغط إلى وسيط العمل (4 - 1) ويتم هنا في مولد البخار [(4 - 5) تسخين أولي للماء في الموفر، ثم تبخر (4 - 5) في المبخر وبعدها تجميخ (1 - 6) في المحمص].
- يحدث في العنفة تمدد أدياباتسي (نظرياً هو ايزونتروبي) للبخار من الحالة الابتدائية (بخار محمص ضغطه p_1 ودرجة حرارته t_1 والانتالبي النوعي له h_1) إلى الحالة 2 (بخار رطب ضغطه p_2 ودرجة حرارته t_2 والانتالبي النوعي له h_2) ويتم ذلك عند انتروبي نوعي ثابت ($s_1 = s_2$).
- العمل المحرك النوعي: هو العمل الناتج عن 1 kg بخار عند تمدده بشكل عكوس في العنفة وهو يساوي هبوط الانتالبي لهذا البخار Δh_T :

$$(1.3) \quad w_T = \Delta h_T = h_1 - h_2 \quad [\text{kJ/kg}]$$

في المكثف تُطرح الحرارة عند ضغط ثابت $p_2 = \text{const}$ وأثناء ذلك تبقى درجة الحرارة مساوية لدرجة حرارة الإشباع t_2 المقابلة لذلك الضغط. في مدخل المكثف يقع الوسيط العامل الذي هو البخار (عند النقطة 2) في مجال البخار الرطب وتكون نسبة جفافه أصغر من الواحد ($x_2 < 1$) وبالتالي فنسبة رطوبته ($1 - x_2$) أما الماء المتكاثف عند مخرج المكثف فهو سائل مشبع عند الضغط p_2 ولذلك تقع النقطة 3 على منحنى الإشباع ($x = 0$). تنتج الحرارة للطروحة من كل 1 kg بخار من فرق الانتالبي كما يلي:

$$(2.3) \quad q_R = h_2 - h_3 \quad [\text{kJ/kg}]$$



الشكل 2.3: دورة عمل كلاوزيوس رانكين (a) على المخطط p, v ; (b) على المخطط T, S ; (c) على المخطط h, S .

يحدث في مضخة مياه التغذية انضغاط ايزوتروبي للماء ويرافق ذلك ارتفاع للضغط من p_2 إلى p_1 ولانتالبي من h_3 إلى h_4 . يبلغ الاستهلاك النوعي للعمل للبترول لدورة العمل بالنسبة إلى 1 kg ماء:

$$(3.3) \quad w_p = v_3 (p_1 - p_2) = h_4 - h_3 \quad [\text{kJ/kg}]$$

أما العمل النوعي المفيد لدورة العمل بالنسبة إلى 1 kg بخار فيحسب كما يلي:

$$(4.3) \quad w_u = w_T - w_p \quad [\text{kJ/kg}]$$

من المعادلة (3.3) يمكن حساب الانتالبي النوعي للماء h_4 :

$$(5.3) \quad h_4 = h_3 + w_p \quad [\text{kJ/kg}]$$

تتم إضافة الحرارة في مولد البخار والمحصر عند ضغط ثابت $p_1 = \text{const}$. في البداية يُسخّن الماء حتى يصل إلى درجة حرارة الإشباع t_{s1} (4 - 5)، بعد ذلك يتبخّر الماء عند درجة حرارة ثابتة t_{s1} (5 - 6)، وأخيراً يجري التخميص حيث ترتفع درجة الحرارة للبخار من t_{s1} إلى t_1 . تحسب الحرارة النوعية المضافة لكل 1 kg من البخار كما يلي:

$$(6.3) \quad q_s = c_{pw} (t_{s1} - t_4) + h_{ev} + c_{pv} (t_1 - t_{s1}) \quad [\text{kJ/kg}]$$

حيث: c_{pw} و c_{pv} الحرارة للبخار وللماء على التوالي $[\text{kJ/kg}]$

t_{s1} درجة حرارة الإشباع عند الضغط p_1 بالـ $[\text{°C}]$

t_4 درجة حرارة ماء التغذية $[\text{°C}]$

h_{ev} الإنتالبي النوعي للتبخير $[\text{kJ/kg}]$

t_1 درجة حرارة البخار المحصر (البخار الطازج) $[\text{°C}]$

تحسب q_s عادة عن طريق الانتالبي النوعي للبخار الطازج h_1 وانتالبي الماء h_4 :

$$(7.3) \quad q_s = h_1 - h_4 \quad [\text{kJ/kg}]$$

تحسب معادلة موازنة الإكسرجي للمنشأة البخارية من أجل 1 kg بخار كما يلي:

$$(8.3) \quad q_s + w_p = w_1 + q_R \quad [\text{kJ/kg}]$$

إن الماء وسيط غير قابل للانضغاط ولذلك فإن العمل اللازم للمضخة w_p صغير عند مقارنته بالحدود الأخرى للمعادلة 7.3، وبالتالي فالحد w_p لا يؤخذ بعين الاعتبار ويعتبر العمل النوعي المفيد w_u للدورة مساوياً لـ w_T .

من المعادلة 3.3 ينتج:

$$(9.3) \quad h_4 = h_3 + w_p \approx h_3$$

إضافة إلى ذلك يكتب انتالبي الماء للتكاثف h_3 بالشكل h'_2 وهذا يوافق انتالبي السائل المشبع (الماء الذي يغلي) عند الضغط p_2 .
النقطة الحدية لبخار الماء هي:

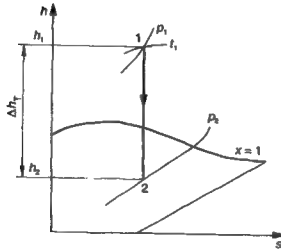
$$p_{cr} = 221.2 \text{ bar} , \quad t_{cr} = 374.15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

وبالتالي ينتج:

$$(10.3) \quad q_s \approx h_1 - h'_2 \quad [\text{kJ/kg}]$$

وكذلك:

$$(11.3) \quad q_R \approx h_2 - h'_2 \quad [\text{kJ/kg}]$$



الشكل 3.3 : التمدد الايزوتروبي لبخار الماء في المخطط $h-s$.

مردود دورة عمل البخار، والتي يعبر عنها بالمردود الحراري:

$$(12.3) \quad \eta_{th} = \frac{w_T}{q_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}$$

لتحديد الانتالبي h_1 و h_2 يستخدم المخطط $h-s$ لبخار الماء، والشكل (3.3) يبين تمثيلاً
ايرونتروبياً لبخار الماء في المخطط $h-s$ ، وقد أُشير إلى هبوط الانتالبي بـ Δh_1 . الأمثلة التالية
توضح الاستخدام العملي للتحليل الترموديناميكي لدورة البخار البسيطة.

مثال 1.3

محطة بخارية تعمل وفق دورة رانكين — كلاوزيوس حيث شروط الدخول إلى العنفة هي: $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$ ، $t_1 = 535^\circ \text{C}$ ، وضغط المكثف $p_2 = 0.006 \text{ Mpa}$.

بالاستعانة بكلٍّ من المخطط $h-s$ وجدول الماء والبخار عند الإشباع (انظر الجدول A.5 حتى
A.9 في الملحق)، يُطلب تحديد ما يلي:

1. مواصفات الحالة لوسيط العمل (الضغط p ، درجة الحرارة t ، الحجم النوعي v ، الطاقة الداخلية النوعية u ، الانتروبي النوعي s) عند النقاط المميزة لدورة العمل.
2. العمل المبذول لتشغيل العنفة.
3. نسبة الجفاف والرطوبة بعد التمدد في العنفة.

الحل

1. يمكن قراءة الانتالبي النوعي h_1 والانتروبي النوعي s_1 للبخار المحمص (النقطة 1) عند ضغط معطى p_1 ودرجة حرارة معطاة t_1 . كذلك يمكن تحديد الانتالبي النوعي h_2 للبخار الرطب عند p_2 (النقطة 2) بنفس الطريقة من المخطط $h-s$ (انظر الشكل A.1 في الملحق) خلال ذلك يكون $s_1 = s_2$. الحجم النوعي v يمكن إيجاد مسن الجدول A.9 (انظر الملحق). القيم المميزة للماء (s ، t ، h ، v) عند حالة الإشباع 3 تؤخذ من الجدول A.5 أو A.6 (الملحق) عند الضغط p_2 . الطاقة الداخلية النوعية u لوسيط العمل تحسب بشكل عام كما يلي: $u = h - p v$.

2. نسبة الجفاف للبخار بعد تمدده في العنفة يستنتج من المخطط $h-s$: $x_2 = 0.77$ ، أما الرطوبة النهائية فهي $(1 - x_2)$ أي 0.23.

3. مواصفات البخار بعد تمدده في العنفة (النقطة 2) تُحسب من مواصفات الماء والبخار عند حالة الإشباع عند الضغط p_2 ونسبة الجفاف x_2 للبخار المغادر للعنفة. الحجم النوعي للبخار الرطب v_2 ينتج من الحجم النوعي للماء عند نقطة الإشباع ($v' = 1.0064 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$) والحجم النوعي للبخار المشبع ($v'' = 23.74 \text{ m}^3/\text{kg}$) ويصبح:

$$\begin{aligned}
v_2 &= (1 - x_2) v' + x_2 v'' \\
&= (1 - 0.77) 1.0064 \times 10^{-3} + 0.77 \times 23.74 \\
&\approx 0.77 \times 23.74 = 18.28 \text{ m}^3/\text{kg}
\end{aligned}$$

4. لحساب العمل المبذول لتشغيل العنفة نكتب:

$$\begin{aligned}
w_p &= v_3 (p_1 - p_2) \\
&= 1.0064 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} (13500 - 6) \text{ KPa} = 13.58 \text{ kJ} / \text{kg}
\end{aligned}$$

5. الاتالي النوعي للماء عند النقطة 4:

$$\begin{aligned}
h_4 &= h_3 + w_p \\
&= 151.5 \text{ kJ} / \text{kg} + 13.58 \text{ kJ} / \text{kg} = 165.08 \text{ kJ} / \text{kg}
\end{aligned}$$

6. درجة حرارة الماء عند النقطة 4 حيث الضغط $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$ و $h_4 = 165.08 \text{ kJ} / \text{kg}$ تؤخذ

من الجدول A.3 وهي $t_4 = 36.551^\circ\text{C}$.

كل هذه القيم رتب في الجدول (5.3) حيث تم تمييز القيم المعطاة في المسألة بوضع خط تحتها أما القيم التي تم حسابها فكتبت بحروف غامقة.

الجدول 5.3: مواصفات الحالة للماء والبخار عند النقاط المميزة الواقعة على دورة عمل كلازيوس - رانكين

حالة النقطة	$P[\text{MPa}]$	$t[^\circ\text{C}]$	$v[\text{m}^3/\text{kg}]$	$u[\text{kJ}/\text{kg}]$	$h[\text{kJ}/\text{kg}]$	$s[\text{kJ}/\text{kgK}]$
1	13.5	53.5	0.02429	3392.21	3425	6.54
2	0.006	36.183	18.28	1905.32	2015	6.54
3	0.006	36.183	1.0064×10^{-3}	151.494	151.50	0.5209
4	13.5	36.551	1.0064×10^{-3}	151.494	165.08	0.5209

مثال 2.3

من أجل المحطة البخارية الواردة في المثال 1.3، ويإهمال العمل المبذول لتشغيل العنفة، يُطلب تحديد المقادير التالية لدورة العمل: العمل النوعي للعنفة، الحرارة النوعية المضافة والمطروحة، المردود الحراري النظري للدورة.

يمكن الاستعانة بالجدول 5.3 لتحديد مواصفات وسيط العمل (البخار/الماء).

الحل:

1. العمل النوعي للعتفة:

$$w_T = h_1 - h_2 = 3425 - 2015 = 1410 \text{ kJ / kg}$$

$$w_o = w_T = 1410 \text{ kJ / kg} \quad \text{العمل المفيد للدورة:}$$

$$h_4 = h_3 = 151.50 \quad \text{بما أن } w_p = 0 \text{ فإن:}$$

$$t_4 = t_3 = 36.183^\circ\text{C} \quad \text{و}$$

3. الحرارة النوعية المضافة:

$$q_s = h_1 - h_4 = 3425 - 165.08 = 3259.92 \text{ kJ / kg}$$

الحرارة النوعية المطروحة:

$$q_R = h_2 - h_3 = 2015 - 151.50 = 1863.5 \text{ kJ/kg}$$

4. المردود الحراري للدورة:

$$\eta_{th} = \frac{1410 \text{ kJ / kg}}{3273.5 \text{ kJ / kg}} = 0.4307$$

مثال 3.3

من أجل المثال 1.3، إذا تمت مراعاة العمل اللازم لتشغيل المضخة فإنه يطلب حساب كميات الحرارة النوعية والمردود الحراري لدورة البخار، كذلك يُطلب مقارنة المردود الحراري الناتج مع المردود الحراري في المثال 2.3.

الحل:

1. من المثالين 1.3 و 2.3 نجد:

$$- \text{العمل النوعي المستهلك لتشغيل مضخة الماء: } w_p = 13.58 \text{ kJ / kg}$$

$$- \text{الاتتالي النوعي للماء عند النقطة 4: } h_4 = 165.08 \text{ kJ/kg}$$

$$- \text{العمل النوعي للعتفة: } w_T = 1410 \text{ kJ/kg}$$

$$2. \text{ وبالتالي العمل المفيد: } w_o = w_T - w_p = 1410 \text{ kJ / kg} - 13.58 \text{ kJ / kg} = 1396.42 \text{ kJ / kg}$$

$$q_s = h_1 - h_4 = 3425 - 165.08 = 3259.92 \text{ kJ/kg} \quad \text{الحرارة النوعية المضافة:}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{th}}{q_s} = \frac{1396.42}{3259.92} = 0.4284 \text{ :المردود الحراري}$$

3. بالمقارنة بالمردود $\eta_{th} = 0.4307$ الوارد في المثال 2.3 نجد أن الفرق هو فقط 0.5 %.

مثال 4.3

من أجل دورة البخار الواردة في المثال 1.3 يُطلب حساب المردود الحراري بالاستعانة بدرجة الحرارة الوسطية T_s و T_R لإضافة الحرارة وطرحها.

الحل

1. تجري عملية إضافة الحرارة بين النقطة التي تميز ماء التغذية ونقطة البخار الطازج. مواصفات ماء التغذية $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$, $t_2 = 36.55^\circ\text{C}$, مواصفات البخار الطازج هي $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$, $t_1 = 335^\circ\text{C}$ وبالتالي فدرجة حرارة إضافة الحرارة الوسطية:

$$T_s = \frac{q_s}{\Delta s_s} = \frac{3259.92 \text{ kJ/kg}}{(6.54 - 0.5209) \text{ kJ/kg}} = 541.55 \text{ K} = 268.4^\circ\text{C}$$

2. درجة طرح الحرارة الوسطية T_R مساوية لدرجة حرارة الإشباع عند ضغط المكثف $T_R = T_2 = 36.18^\circ\text{C} = 309.33 \text{ K}$; $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$.
3. المردود الحراري إذاً:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{309.33 \text{ K}}{541.55 \text{ K}} = 0.4288$$

(قارن $\eta_{th} = 0.4307$ من المثال 2.3)

3.3 استطاعة العنفة البخارية

تُحسب استطاعة العنفة النظرية (الأعظمية) P_T عند تمدد ايزوثيرموسي للبخار (كظيم وعكوس) كما في الشكل (4.3):

$$P_T = m_v w_T = m_v \Delta h_1 = m_v (h_1 - h_2) \quad [\text{kW}] \quad (13.3)$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار $[\text{kg/s}]$

h_2, h_1 الإنتالبي النوعي للبخار قبل دخوله إلى العنفة وبعد مغادرته لها $[\text{kJ/kg}]$

Δh_i الهبوط النظري (الإيزنتروبي) للإنتالبي ضمن العنفة [kJ/kg]
 التمدد الفعلي للبخار (1 - 2) في العنفة عكوس ويرافقه زيادة في الانتروبي أي أن $s_2 > s_1$.
 بحسب العمل النوعي الفعلي للعنفة $w_{T,1}$ عن طريق هبوط الإنتالبي Δh_i في عنفة فعلية (الشكل 4.3).

$$(14.3) \quad w_{T,1} = \Delta h_i = h_1 - h_{2,i}$$

حيث: $h_{2,i}$ الإنتالبي النوعي الفعلي للبخار بعد مغادرته للعنفة [kJ/kg].
 وبالتالي فالاستطاعة الفعلية للعنفة:

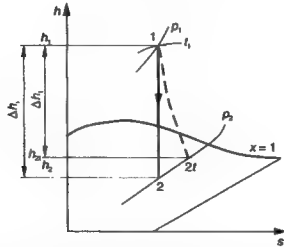
$$(15.3) \quad \begin{aligned} P_{T,1} &= P_T \quad h_{T,1} = m_v (h_1 - h_2) \eta_{T,1} \\ &= m_v (h_1 - h_{2,i}) \quad [\text{kW}] \end{aligned}$$

حيث: $\eta_{T,1}$ المردود الداخلي للعنفة.

وتتراوح قيمته للعنفات البخارية بين 0.88 و 0.93.

الإنتالبي النوعي الفعلي $h_{2,i}$ للبخار بعد العنفة:

$$(16.3) \quad h_{2,i} = h_1 - (h_1 - h_2) \eta_{T,1}$$



الشكل 4.3: الهبوط النظري والفعلي للإنتالبي عند تمدد البخار في العنفة بشكل عكوس أو غير عكوس.
 نسبة الجفاف للبخار المغادر للعنفة قيمة هامة تؤثر على التشغيل الآمن الطويل الأمد للعنفة،
 وتُحسب نسبة الجفاف x_{2i} للبخار الرطب بعد مغادرته العنفة كما يلي:

$$(17.3) \quad x_{2i} = \frac{h_{2,i} - h'_2}{h'_2 - h'_2}$$

حيث: h'_2, h''_2 الانتالبي النوعي لكل من الماء المشيع والبخار المشيع على التوالي عند ضغط المغادرة p_2 .

أما نسبة الرطوبة النهائية للبخار بعد العنفة فهي $1 - x_{21}$.

4.3 تحسين مردود محطات الطاقة البخارية

1.4.3 رفع مؤشرات البخار الطازج وتخفيض ضغط المكثف

طرق رفع المردود الحراري

عرض في المقطع 1.3 مبدأ رفع المردود الحراري للدورة ما تستخدم لتحويل الطاقة الحرارية إلى عمل ميكانيكي، ووفقاً لهذا المبدأ يرتفع مردود محطة الطاقة البخارية بزيادة درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة T_3 وبتخفيض درجة الحرارة الوسطية الحرارة T_R . بناء على ذلك يُرفع المردود الحراري للدورة كلاوزيوس — رانكين عن طريق:

□ رفع الضغط p_1 ودرجة الحرارة t_1 للبخار الطازج الداخل إلى العنفة.

□ تخفيض ضغط المكثف p_2 .

□ التحميص الوسطي للبخار.

□ التسخين الأولي والمتجدد لماء التغذية.

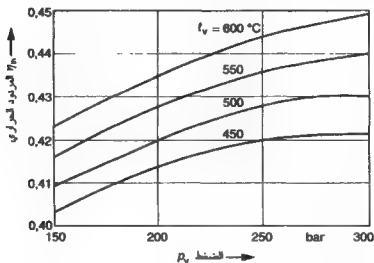
تأثير مواصفات البخار الطازج

إن رفع ضغط ودرجة حرارة البخار الطازج هو أحد الإجراءات الأساسية لتحسين المردود الحراري لمحطة الطاقة البخارية، وبمذه الطريقة ترتفع درجة الحرارة الوسطية عند الدخول T_3 (الشكل 5.3) مما يؤدي إلى رفع المردود الحراري.

عند ضغط عالٍ جداً ودرجة حرارة شديدة الارتفاع للبخار الطازج تزداد الاجهادات التي تتعرض لها أجزاء المنشأة. عندما ترتفع درجة حرارة المعادن لأكثر من 550 °C فيجب استخدام أنواع عالية من الفولاذ لكل من المحمصات ولشفرات العنفة (فولاذ أوستينيتي). ومحطات الطاقة البخارية الحديثة يصل ضغط البخار القيمة 250 إلى 300 bar ودرجة حرارته 550 إلى 600 °C.

يرفع (p_1, t_1) للبخار الطازج وبتخفيض ضغط المكثف p_2 يزداد المردود الحراري لمحطة الطاقة البخارية. والشكل (5.3) يبين تأثير مواصفات البخار الطازج على قيمته η_{th} . تنخفض عندئذ نسبة

جفاف البخار المغادر للعنفة x_2 . وبهذا ينشأ في المرحلة الأخيرة للعنفة خطر التآكل للشفرات بفعل قطرات الماء الموجودة في البخار الرطب مما يؤثر على عمر شفرات العنفة.



الشكل 5.3 : تأثير مواصفات البخار الطازج (p_1 و t_1) على المردود الحراري η_{th} لخططة الطاقة البخارية.

مثال 5.3

إذا كانت مواصفات البخار لدى دخوله إلى العنفة من أجل المثال 1.3 كما يلي: $p_1 = 200 \text{ bar}$ و $t_1 = 600^\circ\text{C}$. كيف يتغير المردود الحراري في هاتين الحالتين مقارنة بالمثال 1.3 وذلك: بإهمال العمل اللازم لتشغيل المضخة.

الحل:

1. من المثال 1.3 يمكن تحديد مواصفات النقاط المختلفة

— للبخار الطازج: $t_1 = 535^\circ\text{C}$, $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$, $h_1 = 3425 \text{ kJ/kg}$.

— البخار بعد مغادرة العنفة: $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$, $h_2 = 2015 \text{ kJ/kg}$.

— الماء المتكاثف (البخار بعد تمدده ومروره في المكثف) $h'_2 = 151.5 \text{ kJ/kg}$.

العمل النوعي المقيد $w_T = w_u \approx$ الحرارة النوعية المضافة $q_s \approx h_1 - h_2 =$

3273.5 kJ/kg ، المردود الحراري $\eta_{th} = 0.4307$.

2. عند $p_1 = 20 \text{ MPa}$ و $t_1 = 600^\circ\text{C}$ و $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$ نجد من المخطط s-h:

$h_1 = 3535 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = s_2 = 6.505 \text{ kJ/kg}$

$$h_2 = 2000 \text{ kJ/kg}, h_2 = 151.5 \text{ kJ/kg}$$

3. لحساب العمل النوعي المفيد نكتب:

$$w_u \approx w_T = h_1 - h_2 = 3535 \text{ kJ/kg} - 2000 \text{ kJ/kg} = 1535 \text{ kJ/kg}$$

4. الحرارة النوعية الداخلة (عند الدخول):

$$q_s \approx h_1 - h_2 = 3535 \text{ kJ/kg} - 151.5 \text{ kJ/kg} = 3383.5 \text{ kJ/kg}$$

5. المردود الحراري للدورة المحسنة:

$$\eta_{th} = w_u / q_s = 1535 \text{ kJ/kg} / 3383.5 \text{ kJ/kg} = 0.4537$$

6. بمقارنة المردود الحراري للدورة المحسنة (0.4537) بالمردود الأصلي (0.4307) للدورة نجد أنه قد

ازداد بمقدار: $(0.4537 - 0.4307) / 0.4307 = 5.3\%$.

6.3 مثال

إذا رفع ضغط المكثف في المثال 5.3 إلى $p_2 = 0.1 \text{ bar}$ فما هو المردود الحراري مقارنة بالمثال

؟5.3

الحل

1. بالاستعانة بالمخطط h-s وعند $p_1 = 20 \text{ MPa}$ ، $t_1 = 600^\circ\text{C}$ و $p_2 = 0.01 \text{ MPa}$ نجد من أجل

محطة الطاقة البخارية ما يلي:

$$h_1 = 3535 \text{ kJ/kg}, s_1 = s_2 = 6.505 \text{ kJ/kg}, h_2 = 2057 \text{ kJ/kg}, h_2 = 191.83 \text{ kJ/kg}$$

2. العمل النوعي المفيد: $w_u \approx w_T = h_1 - h_2 = 3535 \text{ kJ/kg} - 2057 \text{ kJ/kg} = 1478 \text{ kJ/kg}$

الحرارة النوعية عند الدخول $q_s \approx h_1 - h_2 = 3535 \text{ kJ/kg} - 191.83 \text{ kJ/kg} = 3343.17 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{th} = \frac{w_u}{q_s} = \frac{1478 \text{ kJ/kg}}{3343.17 \text{ kJ/kg}} = 0.4421$$

3. بالمقارنة بنتائج المثال 5.3 فإن المردود الحراري ينقص بمعدل:

$$(0.4537 - 0.4421) / 0.4537 = 2.56 \%$$

2.4.3 التحميم الوسطي

الغاية الأساسية من التحميم الوسطي للبخار هي رفع نسبة جفاف البخار x بعد تمدده في

العتفة لتحاشي تآكل الشفرات في المراحل الأخيرة للعتفة بفعل رطوبة البخار. وتقسّم العتفة بذلك

إلى مجموعتي أجزاء: الأجزاء ذات الضغط العالي (عنفة الضغط العالي) والأجزاء ذات الضغط المنخفض (عنفة الضغط المنخفض). يتم في الجزء الوسطي تسخين البخار بعد تمدده في عنفة الضغط العالي في محمص وسطي حتى يصل إلى درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة البخار الطازج (الذي يدخل أولاً إلى العنفة). وهذه الطريقة يمكن رفع المردود الحراري، حيث تصبح درجة حرارة الدخول الوسطية لهذه الدورة أعلى من درجة الحرارة الوسطية بدون تحميص وسطي. الشكل (6.3) يبين أجزاء محطة الطاقة البخارية عند وجود تحميص وسطي وكذلك دورة العمل على المخطط T-S. تتألف عملية البخار بوجود تحميص وسطي من:

- تمدد في عنفة الضغط العالي (1 - 2).
- تحميص وسطي للبخار (2 - 3) في المحمص الوسطي (Reheater).
- تمدد للبخار في عنفة الضغط المنخفض (3 - 4).
- تكاثف البخار في المكثف (4 - 5).
- رفع ضغط الماء في مضخة مياه التغذية P (5 - 6).
- تسخين أولي للماء (6 - 7) ثم تبخر (7 - 8) وبعده تحميص للبخار (8 - 1) في كل من مولد البخار ثم المحمص (Superheater).
- يجري التحميص الوسطي بتقديم حرارة إضافية ولذلك تحسب كمية الحرارة النوعية المضافة والعمل المفيد بإهمال العمل اللازم لتشغيل مضخة الإمداد بالماء كما يلي:

$$(18.3) \quad q_2 \approx (h_1 - h'_3) + (h_3 - h_2) \quad [\text{kJ/kg}]$$

$$(19.3) \quad w_u \approx w_T = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) \quad [\text{kJ/kg}]$$

وبذلك ينتج المردود الحراري للدورة بوجود تحميص وسطي:

$$(20.3) \quad \eta_{th} = W_u / q_2 = [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] / [(h_1 - h'_3) + (h_3 - h_2)]$$

باختيار أمثل لضغط التحميص الوسطي يتحقق رفع للمردود الحراري ويمكن تحديد قيمة هذا الضغط p_{RH} بشكل متناسب مع ضغط البخار الطازج p_v وفقاً للعلاقة التقريبية التالية:

$$(21.3) \quad p_{RH} = 3 \sqrt{p_v} \quad [\text{bar}]$$

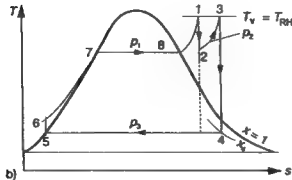
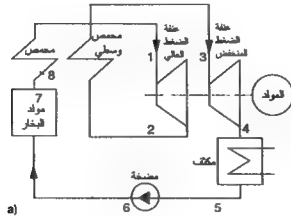
من أجل رفع إضافي لمردود عملية البخار يلجأ إلى التحميص لمرتين متتاليتين، ويمكن حساب ضغط التحميص لكل من المرحلتين بطريقة تقريبية كما يلي:

$$(22.3) \quad p_{RH,1} = 4.5 \sqrt{p_v} \quad \text{و} \quad p_{RH,2} = 1.5 \sqrt{p_v} \quad [\text{bar}]$$

مثال 6.3

من أجل محطة الطاقة البخارية المذكورة في المثال 1.3 تقسم العنفة إلى جزء ذي ضغط عالٍ وآخر ذي ضغط منخفض بينهما تحميص عند الضغط $p_2 = 30 \text{ bar}$ ليصل البخار إلى درجة الحرارة $t_3 = 535^\circ\text{C}$ (انظر الشكلين 6.3 a, b). مواصفات بخار العنفة ذات الضغط العالي عند الدخول هي $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$ و $t_1 = 535^\circ\text{C}$ أما ضغط المكثف فهو $p_3 = 0.006 \text{ MPa}$.

كيف يتغير المردود الحراري والرطوبة النهائية للبخار بعد عنفة الضغط المنخفض مقارنة بالمحطة الواردة في المثالين 1.3 و 2.3؟



الشكل 6.3 : عملية البخار مع تحميص وسطي (a) مخطط التسلسل (b) مخطط T-s.

الحل:

1. من أجل محطة الطاقة البخارية المرجعية:

للبخار الطازج $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$, $t_1 = 535^\circ\text{C}$, $h_1 = 3425 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 6.54 \text{ kJ/kg}$.

البخار بعد مفادته للعنفة: $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$, $h_2 = 2015 \text{ kJ/kg}$.

وعند الضغط p_2 يكون: $h_2 = 151.50 \text{ kJ/kg}$.

العمل النوعي المفيد $w_u = 1410 \text{ kJ/kg}$

الحرارة النوعية المضافة $q_s = 3273.5 \text{ kJ/kg}$

المردود الحراري للمحطة البخارية المرجعية $\eta_{th} = 0.4307$. الرطوبة النهائية للبخار المغادر للعنفة

$$(1 - x_2 = 0.23)$$

2. مواصفات البخار عند دخوله إلى عنفة الضغط العالي عند وجود تحميص وسطي هي نفس

مواصفات البخار عند النقطة 1.

3. مواصفات البخار عند التقطتين 2 و 3 في حالة التحميص الوسطي كالتالي: يجري التحميص إلى

$h_2 = 2990 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 3535 \text{ kJ/kg}$ على $t_3 = 535^\circ\text{C}$ و $p_2 = 30 \text{ bar}$ من مخطط h-s نحصل على

4. مواصفات البخار عند النقطة 4: $p_3 = 0.006 \text{ MPa}$, $h_4 = 2258 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = s_4 = 7.33 \text{ kJ/kg}$ و

$$x_4 = 0.873 \text{ (من المخطط h-s)}$$

أما رطوبة البخار للعنفة فتبلغ $(1 - x_4 = 0.127)$ بينما تكون رطوبة البخار بدون تحميص

وسطي 0.23.

5. مواصفات الماء عند النقطة 5: $h_5 = h'_3 = 151.5 \text{ kJ/kg}$ من الجدول (من الجدول 5.3)

6. عند إجراء التحميص الوسطي نحصل على القيم التالية:

العمل النوعي المفيد:

$$w_u \approx w_T = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

$$= (3425 - 2990) + (3535 - 2258) = 435 + 1277 = 1712 \text{ kJ/kg}$$

الحرارة النوعية المضافة:

$$q_s \approx (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) = (3425 - 151.5) + (3535 - 2990)$$

$$= 3273.5 + 545 = 3818.5 \text{ kJ / kg}$$

$$\eta_{th} = \frac{w_{th}}{q_s} = \frac{1712 \text{ kJ/kg}}{3818.5 \text{ kJ/kg}} = 0.4483$$

7. بالمقارنة مع المحطة المرجعية فإن المردود الحراري يتناقص بمعدل:

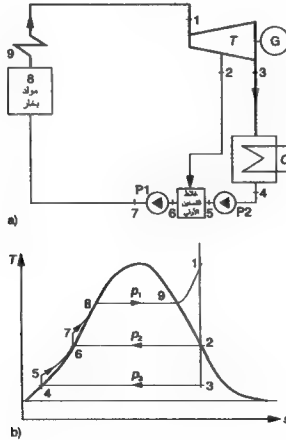
$$(0.4483 - 0.4307) / 0.4307 \approx 4.1 \%$$

3.4.3 التسخين الأولي المتجدد لماء التغذية

تحليل

تعتبر عملية التسخين الأولي لماء تغذية المحطة البخارية وسيلة فعالة في رفع المردود الحراري للمحطة.

يبين الشكل (7.3) أجزاء المحطة البخارية مع تسخين متجدد لماء التغذية بالإضافة إلى مخطط T-s للدورة.



الشكل 7.3 : محطة طاقة بخارية ذات تسخين أولي متجدد لماء التغذية (a) المخطط التسلسلي مع خلاط التسخين الأولي، (b) المخطط T-s.

تطبيق العلاقات التالية:

— عمل التمدد للعنفة w_T :

$$(23.3) \quad w_T = (h_1 - h_3) - a(h_2 - h_3) = (h_1 - h_2) + (1 - a)(h_2 - h_3) \quad [\text{kJ/kg}]$$

— العمل اللازم لرفع ضغط وسيط العمل (لمضختين)

$$(24.3) \quad w_p = (1 - a) v_3' (p_2 - p_1) + v_2' (p_1 - p_2) \\ = (1 - a)(h_3 - h_2') + (h_2 - h_2') \quad [\text{kJ/kg}]$$

— العمل المفيد للدورة في هذا الحالة

$$(25.3) \quad w_u = w_T - w_p \quad [\text{kJ/kg}]$$

المعادلات 23.3 حتى 25.3 هي قيم نوعية، أي من أجل 1 kg بخار.

إذا أهمل w_p مقارنة بـ w_T فإن العمل النوعي المفيد:

$$(26.3) \quad w_u \approx w_T \quad [\text{kJ/kg}]$$

وبناء عليه ينتج أن العمل المفيد النوعي لدورة البخار عند التسخين المتحد للماء أقل منه في حالة الدورة بدون تسخين أولي لمياه التغذية.



الشكل 8.3 : مخطط خلاط تسخين ماء أولي.

خلاط التسخين الأولي لماء التغذية

من أجل التسخين المتحد للماء التغذية يمكن استخدام إما خلاط التسخين الأولي أو المسخن الأولي المقفل. وخلاطات التسخين الأولي أفضل من الناحية الترموديناميكية لأنه يمكن تسخين الماء حتى درجة حرارة إشباع البخار المستنزف (Bleeding Vapour)، والشكل (8.3) يبين مخطط خلاط يحدث فيه تسخين أولي للماء عن طريق الحرارة التي تنتقل من البخار المستنزف من العنفة بشكل مباشر إلى الماء المتكاثف. تحسب كمية البخار المستنزف منسوبة لـ 1 kg بخار طازج من معادلة الموازنة الحرارية لخلاط تسخين الماء الأولي وفق العلاقة التالية:

(27.3)

$$a h_2 + (1 - a) h_3 = h_6$$

وباعتبار $h_5 = h'_2$ و $h_6 = h'_2$ ينتج من المعادلة السابقة:

(28.3)

$$a = \frac{h'_2 - h_3}{h_2 - h'_2} \quad [\text{kg لكل بخار طازج}]$$

تناقص الحرارة النوعية المضافة بواسطة التسخين المتعدد للماء ويصبح:

(29.3)

$$q_s = h_1 - h_2 \approx h_1 - h'_2 \quad [\text{kJ/kg}]$$

ينتج المردود الحراري η_{th} لدورة عمل مسخن الماء الأولي المتعدد كما يلي:

(30.3)

$$\eta_{th} = \frac{w_u}{q_s} \approx \frac{(h_1 - h_3) - a(h_2 - h_3)}{h_1 - h'_2}$$

يرتفع المردود الحراري لدورة العمل مع التسخين المتعدد لماء التغذية لأن تناقص قيمة q_s أكبر من تناقص قيمة العمل النوعي المفيد w_u .

مثال 8.3

من أجل محطة الطاقة البخارية التي ورد ذكرها في المثال 1.3، تؤخذ كمية من البخار من عنفة التكاثف وعند الضغط $p_2 = 0.6 \text{ MPa}$ وتستخدم لخلط تسخين ماء التغذية المتعدد. مواصفات البخار الطازج هي: $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$ و $t_1 = 535^\circ\text{C}$ ، ضغط التكاثف $p_3 = 0.006 \text{ MPa}$. المطلوب تحديد المردود الحراري η_{th} لمحطة الطاقة البخارية ذات التسخين الأولي لماء التغذية.

الحل

1. من المثال 1.3 ومن أجل محطة الطاقة البخارية بدون تسخين لماء التغذية:

□ مواصفات البخار الطازج: $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$ ، $t_1 = 535^\circ\text{C}$ ، $h_1 = 3425 \text{ kJ/kg}$ و $s_1 = 6.54$

kJ/kg K .

□ للبخار المغادر للعنفة المواصفات التالية: $p_2 = 0.006 \text{ MPa}$ ، $h_2 = 2015 \text{ kJ/kg}$.

□ انتالي الماء التكاثف عند الضغط p_2 : $h'_2 = 2015 \text{ kJ/kg}$.

العمل النوعي المفيد: $w_u = 1410 \text{ kJ/kg}$.

الحرارة النوعية المضافة: $q_s = 3273.5 \text{ kJ/kg}$.

المردود الحراري لمحطة الطاقة البخارية المرجعية: $\eta_{th} = 0.4307$.

الرطوبة النهائية للبخار المغادر للenfة: $1 - x_2 \approx 0.23$

2. من أجل محطة الطاقة البخارية مع تسخين أولي متجدد لماء التغذية.

□ مواصفات البخار الطازج: $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$, $t_1 = 535^\circ\text{C}$, $h_1 = 3425 \text{ kJ/kg}$, $s_1 = 6.54 \text{ kJ/kg}$

□ للبخار المغادر للenfة (النقطة 2) المواصفات: $p_2 = 0.6 \text{ MPa}$, $s_2 = 6.54 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 2662.5 \text{ kJ/kg}$ (من مخطط (h-s).

□ الماء المتكاثف من البخار المستنزف مواصفاته: $h'_2 = 359.93 \text{ kJ/kg}$ (من الجدول 6.A في الملحق)

□ البخار المغادر للenfة (النقطة 3) مواصفاته عند الضغط: $p_3 = 0.006 \text{ MPa}$, $t_3 = 6.54^\circ\text{C}$, $h_3 = 2015 \text{ kJ/kg}$, $s_3 = 6.54 \text{ kJ/kg}$

□ للماء المتكاثف من البخار المستنزف عند الضغط p_3 يكون: $h'_3 = 151.50 \text{ kJ/kg}$

3. من الموازنة الحرارية لخلط تسخين الماء الأولي $(h_3 - h'_3)$ $(1 - a)(h_2 - h'_2) = a(h'_2 - h'_3)$ ينتج للجزء المستنزف من البخار من أجل 1 بخار طازج:

$$a = \frac{h'_2 - h'_3}{h_2 - h'_3} = \frac{359.93 - 151.50}{2662.5 - 151.50} = 0.083 \text{ kg/kg}$$

4. من أجل دورة العمل باستخدام تسخين أولي متجدد للماء ينتج:

العمل النوعي المفيد: $w_g \approx w_1 = (h_1 - h_2) - a(h_2 - h_3)$

$$= (3425 - 2015) - 0.083(2662.5 - 2015) = 1410 - 53.74$$

$$= 1356.26 \text{ kJ/kg}$$

والحرارة النوعية المضافة: $q_s \approx h_1 - h'_3 = 3425 - 359.93 = 3065.07 \text{ kJ/kg}$

$$\eta_{th} = \frac{w_g}{q_s} = \frac{1356.26 \text{ kJ/kg}}{3065.07 \text{ kJ/kg}} = 0.4425$$

وعليه يكون المردود الحراري: $\eta_{th} = 0.4425$

5. بمقارنة هذا المردود بمردود دورة البخار المرجعية فإن المردود الحراري يزداد بمقدار:

$$(0.4425 - 0.4307) / 0.4307 \approx 2.74\%$$

مسخنات ماء التغذية من النوع المقفل

تستخدم في العادة خمس إلى تسع مراحل من مسخنات الماء المتجددة بحيث تتراوح درجة الحرارة بين 250°C و 330°C ، وكما ذكرنا سابقاً فإن مسخنات الماء ذات الخلطات أفضل من

الناحية الترموديناميكية من المسخنات المقفلة، ولكن استخدام عدة خللاطات يتطلب استطاعات عالية للمضخات، ولهذا تستخدم في كثير من الأحيان مسخنات ماء التغذية من النوع المقفل. وتستخدم عندئذ مضخة ماء واحدة لضخ الماء من خزان ماء التغذية إلى مولد البخار. تقوم مضخة الماء المتكاثف بضخ هذا الماء من المكثف ونقله إلى خزان ماء التغذية، ويكون العمل الذي تستهلكه المضخة في هذه الحالة أقل من العمل اللازم في حالة المسخنات ذات الخللاطات.

الجدير بالذكر بأن خزانات ماء التغذية تقوم بنفس الوقت بدور خللاطات تسخين أولي وساحبات غاز، حيث يتم طرد الأوكسجين من ماء التغذية لتحاشي التآكل في سطوح التسخين الداخلية.

يبين الشكل (9.3) خللاًطاً من النوع المقفل بشكل تخطيطي. يؤخذ البخار اللازم للتسخين الأول للماء من أجزاء العنفة الثلاث: ضغط منخفض — ضغط متوسط — ضغط عالي. فمثلاً في مسخن أولي للماء ضغطه متوسط يجري البخار من العنفة وكذلك الماء المتكاثف من المسخن الأولي للماء ذي الضغط العالي، وهكذا يتكاثف البخار في المسخن الأولي للماء وتتقل الكمية الإجمالية للماء المتكاثف من هذا المسخن الأولي إلى المسخن الأولي ذي الضغط المنخفض أو إلى مكثف العنفة.

يمكن كتابة معادلة التوازن الكتلي بالشكل التالي:

$$(31.3) \quad m_{BV} + m_{c,ent} = m_{c,exit} \quad [kg/s]$$

حيث: m_{BV} التدفق الكتلي للبخار المستنزف من العنفة
 $m_{c,ent}$ التدفق الكتلي للماء المتكاثف القادم إلى المسخن
 $m_{c,exit}$ التدفق الكتلي للماء المتكاثف المغادر للمسخن.

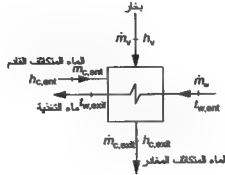
يجري ماء التغذية في الأنابيب عبر المسخن الأولي بتدفق كتلي m_w فيتسخن من $t_{w,ent}$ إلى $t_{w,exit}$. عندما تحمل الضياعات الحرارية، تصبح الموازنة الحرارية للمسخن المقفل (بحسب الشكل 9.3) كما يلي:

$$(32.3) \quad Q = m_{BV} (h_{BV} - h_{c,exit}) + m_{c,ent} (h_{c,ent} - h_{c,exit})$$

$$= m_w c_{pw} (t_{w,exit} - t_{w,ent}) \quad [W]$$

حيث: h الانتالي النوعي [kJ/kg]
 t درجة الحرارة [°C]
 c_{pw} السعة الحرارية النوعية للماء [kJ/kg].

الدلائل تمثل ما يلي: BV البخار المستنزف من العنفة (Bleeding Vapour)، c,ent للماء المتكاثف القادم، c,exit للماء المتكاثف المغادر، W ماء التغذية، ent دخول، exit خروج.



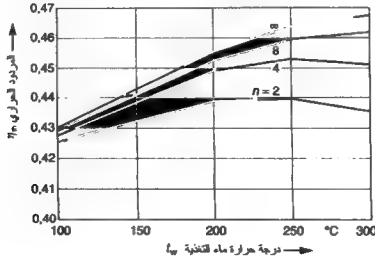
الشكل 9.3 : مخطط المسخنات الأولية المغفلة.

من المعادلة 32.3 ينتج التدفق الكتلي للبخار المستنزف:

$$(33.3) \quad m_v = \frac{m_w c_{pw} (t_{w,exit} - t_{w,ent}) - m_{c,ent} (h_{c,ent} - h_{c,exit})}{h_{BV} - h_{c,exit}} \quad [\text{kg/s}]$$

وتنتج درجة حرارة خروج ماء التغذية كما يلي:

$$(34.3) \quad t_{w,exit} = t_{w,ent} + Q / m_w c_{pw} \quad [^\circ\text{C}]$$



الشكل 10.3 : تأثير عدد المسخنات الأولية على مردود مولد البخار η_{th} .

يبيّن الشكل (10.3) تأثير عدد المسخنات n على المردود الحراري لدورة البخار. عندما تكون $n = 8$ يكون أس التحسن قد استفذ عملياً.

مثال 9.3

يطلب تحديد تدفق كتلة البخار الساحن الذي مواصفاته $p_{BV} = 2 \text{ bar}$ و $t_{BV} = 160^\circ\text{C}$ وذلك من أجل مسخن أولي لماء التغذية. تعطى من أجل ماء التغذية القيم التالية:

التدفق الكتلي للماء $m_w = 500 \text{ kg/s}$ ، ضغط الماء $p = 10 \text{ bar}$ وقبل المسخن الأولي معلوم:

$t_{w,ent} = 90^\circ\text{C}$ ، $h_{w,ent} = 377.7 \text{ kJ/kg}$ أما بعد المسخن الأولي:

درجة حرارة الماء: $t_{w,exit} = 120^\circ\text{C}$ ، الانتالبي $h_{w,exit} = 504.3 \text{ kJ/kg}$.

قيم تدفق الكتلة، الضغط، الانتالي للماء للتكاثف الذي يدخل إلى المسخن الأولي اللاحق هي:

$m_{c,ent} = 18 \text{ kg/s}$ ، $p_c = 4.5 \text{ bar}$ ، $h_{c,ent} = 623.16 \text{ kJ/kg}$

انتالي بخار الماء المتكاثف المغادر هو: $h_{c,exit} = 504.78 \text{ kJ/kg}$

الحل

1. انتالي البخار الساحن عند: $p_{BV} = 2 \text{ bar}$ ، $t_{BV} = 160^\circ\text{C}$ هو:

$$h_{BV} = 2790.2 \text{ kJ/kg}$$

2. من أجل التيار الحراري المتبادل نحصل على:

$$\begin{aligned} Q &= m_w c_{pw} (t_{w,exit} - t_{w,ent}) = m_w (h_{w,exit} - h_{w,ent}) \\ &= 500 \text{ kg/s} (504.3 - 377.7) \text{ kJ/kg} = 63300 \text{ kW} \end{aligned}$$

3. من المعادلة 33.3 يمكن حساب التدفق الكتلي للبخار كما يلي:

$$\begin{aligned} m_{BV} &= \frac{m_w (h_{w,exit} - h_{w,ent}) - m_{c,ent} (h_{c,ent} - h_{c,exit})}{h_{BV} - h_{c,exit}} \\ &= \frac{500(504.3 - 377.7) - 18(623.16 - 504.78)}{2790.2 - 504.78} \end{aligned}$$

4.4.3 التخميص للوسطي والتسخين الأولي المتجدد لماء التغذية

يبين الشكل (a11.3) وبشكل تخطيطي عملة بخارية مع تخميص وسطي وتسخين أولي متجدد لماء التغذية، ودورة البخار موضحة على المخطط T,s (b11.3). يمكن من أجل هذه المنشأة كتابة المعادلات التالية:

— العمل النوعي للعنفة :

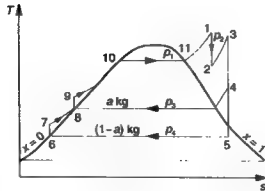
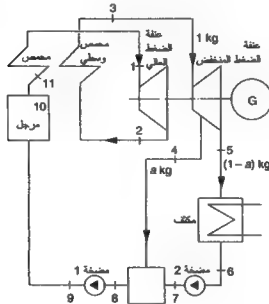
$$(35.3) \quad w_T = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_5) - a(h_4 - h_5) \quad [\text{kJ/kg}]$$

— عمل الانضغاط للعنفة :

$$(36.3) \quad w_p = (1 - a) v_4' (p_3 - p_4) + v_3' (p_1 - p_3) \\ = (1 - a) (h_7 - h_4') + (h_9 - h_3') \quad [\text{kJ/kg}]$$

— وإهمال w_p نجد العمل المفيد :

$$(37.3) \quad w_u \approx w_T \quad [\text{kJ/kg}]$$



الشكل 11.3 : منشأة بخارية ذات تجميع وسطي وتسخين أولي (a) المخطط التسلسلي (b) مخطط T,s.

ومن الموازنة الحرارية لمسخن الماء الأولي:

$$(38.3) \quad a h_8 + (1 - a) h_7 = h_8$$

باعتبار $h_8 = h_3'$ و $h_7 \approx h_4'$ فإن الجزء a من البخار الذي يستنزف من العنفة للتسخين الأولي لماء التغذية هو:

$$(39.3) \quad a = \frac{h_8 - h_7}{h_8 - h_7} = \frac{h_3' - h_4'}{h_8 - h_4'}$$

أما الحرارة النوعية المضافة فتحسب كما يلي:

$$(40.3) \quad q_s = h_1 - h_9 + h_3 - h_2 \approx h_1 - h_3' + h_2 \quad [\text{kJ/kg}]$$

حساب المردود الحراري للدورة η_{th} ذات التسخين الأولي المتحدد للماء والتحميص الوسطي تطبق العلاقة التالية:

$$(41.3) \quad \eta_{th} = \frac{w_{th}}{q_s} = \frac{(h_1 - h_2) + (h_3 - h_9) - a(h_4 - h_3)}{h_1 - h_3' + h_3 - h_2}$$

تستخدم في الحياة العملية كافة طرق تحسين دورة عمل المنشأة البخارية بنفس الوقت، ويتم التسخين الأولي المتحدد عن طريق 5 إلى 8 مراحل، وترفع درجة الحرارة من 250°C إلى 320°C .

مثال 10.3

محطة طاقة بخارية مواصفات بخارها الطازج عند مدخل عنفة الضغط العالي كما يلي:
 $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$ و $t_1 = 535^\circ\text{C}$ ويحصل تحميص للبخار عند $p_2 = 3 \text{ MPa}$ إلى درجة الحرارة $t_3 = 535^\circ\text{C}$ (الشكل a11.3). يتم التسخين الأولي لماء التغذية عند ضغط $p_3 = 0.6 \text{ MPa}$ (الشكل b11.3). ضغط المكثف $p_4 = 0.006 \text{ MPa}$.

كيف يتغير المردود الحراري لهذه المحطة مقارنة بالمحطة البخارية التي لا تحوي تسخيناً أولياً للماء (انظر مثال 7.3).

الحل:

1. من أجل المنشأة ذات التحميص الوسطي وبدون تسخين أولي للماء (من المثال 7.3) نجد:

لنقطة 1: $s_1 = 6.54 \text{ kJ/kg}$, $h_1 = 3425 \text{ kJ/kg}$, $t_1 = 535^\circ\text{C}$, $p_1 = 13.5 \text{ MPa}$
 للنقطتين 2 و 3 (التحميم الوسطي): $h_3 = 3535 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 2990 \text{ kJ/kg}$, $p_2 = 3 \text{ MPa}$
 للنقطتين 4 و 5 (المكثف): $s_4 = 7.33 \text{ kJ/kg}$, $h_4 = 2258 \text{ kJ/kg}$, $p_3 = 0.06 \text{ MPa}$
 $h_3' = 151.5 \text{ kJ/kg}$

العمل النوعي المفيد والحرارة المضافة وكذلك المردود الحراري لهذه الدورة هي:

$$\eta_{th} = 0.4483, q_s = 3818.5 \text{ kJ/kg}, w_s = 1712 \text{ kJ/kg}$$

2. من أجل المنشأة البخارية ذات التحميم الوسطي والتسخين الأولي المتحدد للماء فإن القيم عند النقاط 1 و 2 و 3 هي نفسها الواردة في المثال (7.3).

3. مميزات البخار المستنزف من العنفة (النقطة 4) عند الضغط $p_3 = 0.6 \text{ MPa}$ هي $h_4 = 3043 \text{ kJ/kg}$, $s_4 = 7.33 \text{ kJ/kg}$ ، وللبخار المغادر للعنفة (النقطة 5، قبل المكثف) عند $p_4 = 0.006 \text{ MPa}$ هي $h_5 = 2258 \text{ kJ/kg}$ ويمكن قراءتها من مخطط موليه (h-s) لبخار الماء.

4. عند $p_4 = 0.006 \text{ MPa}$ فإن الإنتالبي النوعي للسائل المتكاثف بعد المكثف (النقطة 6) يؤخذ من الجدول 6.A في الملحق وهو: $h_6 = h_4' = 151.5 \text{ kJ/kg}$

5. وبشكل مشابه فإن الماء في نقطة الإشباع وعن الضغط p_3 (النقطة 8):

$$h_8 = h_3' = 359.93 \text{ kJ/kg}$$

6. تحسب كمية البخار المأخوذة من كل 1 kg بخار طازج للتسخين في مسخن الماء الأولي من الموازنة الحرارية للمسخن الأولي للماء التغذية كما يلي:

$$\alpha = \frac{h_3' - h_4'}{h_4 - h_6} = \frac{359.93 - 151.50}{3043 - 151.50} = 0.072 \text{ kg}$$

7. بسبب استنزاف البخار يصبح العمل المفيد أقل مما لو كانت الدورة بدون تسخين أولي متحدد للماء ويصبح العمل المفيد:

$$\begin{aligned} w_u &= (h_1 - h_2) + (h_3 - h_2) - \alpha (h_4 - h_5) \\ &= (3425 - 2990) + (3535 - 2258) - 0.072 (3043 - 2258) \\ &= 435 + 1277 - 58.59 = 1655.4 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

أما الحرارة المضافة إلى دورة العمل منسوبة إلى 1 kg بخار فهي:

$$\begin{aligned}
q_3 &\approx (h_1 - h'_3) + (h_3 - h_2) \\
&= (3425 - 359.93) + (3535 - 2990) = 3065.07 + 545 \\
&= 3610.07 \text{ kJ/kg}
\end{aligned}$$

8. المردود الحراري للمنشأة البخارية عند إجراء تجميع وسطى وتسخين أولي متحدد لماء التغذية:

$$\eta_{th} = w_o / q_R = 1655.4 / 3610.07 = 0.459$$

9. بالمقارنة مع محطة الطاقة المذكورة في المثال 7.3 يُلاحظ ازدياد في المردود الحراري قدره:

$$(0.459 - 0.44) / 0.44 \approx 4\%$$

5.3 استطاعة الخرج والمردود الإجمالي لمحطة طاقة بخارية

ضیاعات الطاقة

تنشأ في كل محطة طاقة بخارية ضیاعات في مولد البخار، وأنابيب البخار الطازج، وفي العنفة وفي المولدة. كذلك تنخفض الاستطاعة المفيدة للمنشأة بالإضافة إلى ما ذكر بفعل الاستهلاك الذاتي للطاقة لتشغيل المضخات والمراوح والمطاحن (للوquود الصلب) ولمعدات التنظيف... إلخ وتحدد ضیاعات الطاقة بقيمة المردود الموافقة.

وتتألف ضیاعات مولد البخار من: ضیاعات الاحتراق التي تحصل بسبب عدم احتراق جزء من الوقود وانطلاق H_2 , CO وفحوم هيدروجينية مع غازات الاحتراق، وتواجد فحم الكوك (كربون) في الخبث (2 إلى 15 % من حرارة الوقود Q_F)، وضیاعات الاحتراق المحسوسة للخبث (حوالي 1 % من Q_F)، وضیاعات الإشعاع والحمل من السطح الخارجي لمولد البخار (0.5 إلى 2 % من Q_F)، والضیاعات الحرارية مع غازات الاحتراق (5 إلى 15 % من Q_F). يتراوح مردود مولدات البخار η_{BG} لمحطات الطاقة ذات الاستطاعة العالية بين 90 و 93 %.

تنشأ ضیاعات الحركة بفعل مرور البخار وانتقاله ضمن الأنابيب، ويبلغ هبوط الضغط فيها 3 إلى 8 % من ضغط مولد البخار. وتنشأ في العنفة البخارية ضیاعات داخلية وخارجية.

تنشأ الضیاعات الداخلية بفعل عدم العكسية (ضیاعات الاحتكاك والخنق، الخرج، والانفصال، والصدمة في المراحل الأخيرة للعنفة وخاصة عندما تكون الرطوبة النهائية عالية... إلخ) عند التمدد في العنفة. يُضاف (يسترجم) جزء من الضیاعات الداخلية في العنفة ثانية إلى البخار على شكل حرارة (إنتاج انتروبي) وهي تقلل هبوط الإنتالبي h_{th} للعنفة وترفع انتالبي البخار المغادر

للعنفة. ويتم التعبير عن انخفاض العمل المفيد مقارنة بالعملية المثالية بالمردود الداخلي للعنفة η_{IT} . يبلغ هذا المردود لعنفات الضغط العالي والمتوسط 89 إلى 93 %. أما للعنفات البخارية ذات الضغط المنخفض فهو أقل (87 إلى 90 %) بفعل رطوبة البخار النهائية. أما الضياعات الخارجية للعنفة فيعبر عنها بالمردود الميكانيكي η_m (91 إلى 99.5 %). يبلغ مردود المولدة الكهربائية 0.985 في المولدات ذات الاستطاعة الكهربائية 100 MW إلى 300 MW ويبلغ 0.99 في المولدات باستطاعة 500 MW إلى 1000 MW.

ومردود الوصل للعنفة البخارية يتبع من:

$$(42.3) \quad \eta_C = \eta_{IT} \eta_m$$

حيث: η_{IT} المردود الداخلي للعنفة

η_m المردود الميكانيكي للعنفة.

المردود الفعلي لربط محطة الطاقة (المنشأة البخارية)

$$(43.3) \quad \eta_C = P_C / Q_v = \eta_m \eta_{IT} \eta_m$$

حيث: P_C الاستطاعة المقدمة في موقع الوصل بالمولدة (الاستطاعة الفعلية التي تقدمها العنفة البخارية)

Q_v الاستطاعة الحرارية التي يقدمها البخار الطازج للعنفة.

استطاعة خرج المولدة (على أقطاب المولدة)

هي الاستطاعة المقدمة من المولدة P_{el} :

$$(44.3) \quad P_{el} = m_v \Delta h_1 \eta_{IT} \eta_m \eta_G$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار الطازج

Δh_1 المهبوط الايزونتروبي للالتالبي في العنفة

η_{IT} المردود الداخلي للعنفة

η_m المردود الميكانيكي للعنفة

η_G مردود المولدة.

الاستطاعة الكهربائية الصافية P_{el} لحطة الطاقة التي استهلاكها الثاني P_{is} هي:

$$(45.3) \quad P_{el} = P_{el} - P_{is} \text{ [kW]}$$

المردود الإجمالي

يحسب المردود الإجمالي لمحلة الطاقة كما يلي:

$$\eta_{tot} = P_{el} / Q_F = \eta_{SG} \eta_{th} \eta_{IT} \eta_m \eta_G \eta_{Tr} \eta_{is} \quad (46.3)$$

حيث: η_{SG} مردود مولد البخار (حوالي 0.9 إلى 0.92)

η_{th} المردود النظري لدورة العمل (حوالي 0.4 إلى 0.45)

η_{IT} المردود الداخلي للنفقة (حوالي 0.9)

η_m المردود الميكانيكي للنفقة مع علبة سرعة (عند وجودها 0.97 إلى 0.99)

η_G مردود المولدة (0.985 إلى 0.99)

η_{Tr} مردود المحوِّلة

η_{is} المردود الذي يراعي الاستهلاك الذاتي للمرحلة.

يلغ المردود الوسطي لمراحل الطاقة ذات الوقود الاحفوري (المستحاثي) وبدون مراعاة الاستهلاك الذاتي للطاقة في الوقت الحاضر حوالي 38%.

في ألمانيا صممت خلال السبعينات (من القرن العشرين) معظم محطات الطاقة البخارية للوحدات ذات الاستطاعة 300 إلى 750 MW والتي يجري تخميص بخارها وسطياً حتى تصبغ مواصفاته 180 إلى 190 bar و 530°C بحيث تحرق الفحم الحجري والوقود السائل والغاز. تصمم محطات الطاقة البخارية في الوقت الحاضر من أجل المواصفات التالية للبخار المخميص: 240 إلى 260 bar و 540 إلى 560°C، استطاعات الوحدة تقع في المجال 700 إلى 1000 MW.

وفي الولايات المتحدة الأمريكية تقيمن المحطات البخارية ذات المواصفات التالية للبخار المنتج:
 $p_v = 165 \text{ bar}$ (ضغط البخار الطازج)، $t_v = 538^\circ\text{C}$ (درجة حرارة البخار الطازج)
 $t_{RH} = 538^\circ\text{C}$ (درجة حرارة التخميص الوسطي).

أكثر قيم لمواصفات البخار في محطة طاقة بخارية في العالم ذات تخميص وسطي مزدوج (RH_1 و RH_2) هي في محطة Eddystone في أمريكا (USA) التي بنيت عام 1959 وهذه المواصفات هي:
 للبخار الطازج 649 °C، 340 = bar (V)، للتخميص الأولي (RH_1) 566 °C، للتخميص الثاني (RH_2) 566 °C استطاعة الوحدة 325 MW، الاستهلاك النوعي للحرارة 4860 kJ/kg والمردود 42.6%.

أما في المنشآت اليابانية فالمواصفات هي 538 °C و 246 bar للبخار الطازج، وللتحميم الوسطي حتى 566 °C. استطاعة الوحدة تتراوح بين 500 و 1000 MW.

ضياعات الطاقة عند التحميل الجزئي والإقلاع والمباشرة بالإيقاف

تتألف عملية التشغيل من المراحل التالية: بدء التشغيل ريثما يحدث الإقلاع، الانطلاق من بدء عمل حرافات الالتهاب حتى وصل المولدة بالشبكة، البدء بالتوقف ثم التوقف. عند الإقلاع أو بدء التوقف تنشأ ضياعات إضافية: ضياعات بسبب الوقود، ضياعات البخار، ضياعات الاستهلاك الذاتي للطاقة، وضياعات الماء. والوحدات المخصصة للحمولة الوسطى وحمولة الذروة تقلع وتتوقف أكثر من غيرها. والتشغيل عند الحمولات الجزئية يقلل المردود أيضاً. بعد حدوث أعطال في مولد البخار يتم إقلاع المحطة على البارد.

نميز بين إقلاع حار وإقلاع ساخن وإقلاع بارد. فعندما لا تتجاوز فترة توقف المحطة 8 ساعات يكون الإقلاع من النوع الحار، حيث يبقى في هذه الحالة كل من مولد البخار، أنابيب التوصيل، العنف البخارية ومحمل الدورة حاراً. إذا وصل وقت التوقف عن العمل حتى 25 ساعة يصبح الإقلاع بعدئذ ساخناً حيث يكون مولد البخار وأنابيب التوصيل ساخنين أما العنف فتظل حارة. عند الإقلاع البارد يكون المولد بارداً والعنف ساخن أو باردة، ويصل وقت التوقف عندئذ حتى 35 ساعة. عند إيقاف مولد البخار 150 إلى 200 مرة في السنة يزداد استهلاك الوقود السنوي بحدود 2%.

مثال 11.3

ما هي قيمة مردود الوصل (الربط) الفعلي والمردود الإجمالي لمحطة طاقة استطاعتها الكهربائية 900 MW؟ المراديد المختلفة هي: مردود مولد البخار 0.92.

- المردود الحراري $\eta_{th} = 0.5$

- المردود الداخلي للعنف $\eta_{IT} = 0.9$

- المردود الميكانيكي $\eta_m = 0.99$

- مردود المولدة مع المحوِّلة 0.985.

أما الاستهلاك الذاتي لمحطة الطاقة فهو $P_{ie} = 63 \text{ MW}$ أو 7 % من الاستطاعة الكهربائية.

الحل

1. المردود الذي يراعي الاستهلاك الذاتي لمحطة الطاقة:

$$\eta_{is} = 1 - 0.07 = 0.93$$

2. المردود الفعّال لمحطة الطاقة:

$$\eta_C = \eta_{is} \eta_{IT} \eta_m = 0.5 \times 0.9 \times 0.99 = 0.45$$

3. المردود الإجمالي لمحطة الطاقة:

$$\begin{aligned} \eta_{tot} &= \eta_{SG} \eta_{is} \eta_{IT} \eta_m \eta_G \eta_{TT} \eta_{ts} \\ &= 0.92 \times 0.5 \times 0.9 \times 0.99 \times 0.985 \times 0.93 = 0.38 \end{aligned}$$

6.3 الاستهلاك النوعي للوقود وللحرارة في محطة طاقة بخارية

يستخدم لتقدير جودة طاقة بخارية الاستهلاك النوعي للوقود (Specific Fuel Consumption)، والتدفق النوعي للبخار (sfc)، والاستهلاك النوعي للحرارة C_q . يحسب الاستهلاك النوعي للحرارة في المحطة البخارية $C_{q_{sp}}$ أو في مجموعة العنف C_{q_T} (العنف والمولدة). يُحسب الاستهلاك النوعي للوقود لمحطة طاقة بخارية كما يلي:

$$(47.3) \quad sfc = 3600 m_F / P_u \quad [\text{kg لكل kWh طاقة كهربائية}]$$

حيث: m_F استهلاك الوقود $[\text{kg/s}]$

P_u الاستطاعة المفيدة لمحطة الطاقة $[\text{kW}]$.

تستخدم P_u كل من الاستطاعة الفعّالة للربط بالعنف P_e ، واستطاعة ربط المولدة P_g (على أقطاب المولدة) والاستطاعة الكهربائية الصافية P_e ، وذلك للتعبير في المعادلة (47.3). يحسب الاستهلاك النوعي للحرارة في المحطة البخارية كما يلي:

$$(48.3) \quad C_{q_{sp}} = 3600 Q_F / P_u = 3600 m_F LCV / P_u \quad [\text{kJ لكل kWh طاقة كهربائية}]$$

حيث: Q_F التدفق الحراري $[\text{kJ/s}]$ الذي يحمله معه الوقود المحترق

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود $[\text{kJ/kg}]$

η_{sp} مردود محطة الطاقة.

ترتبط قيم المردود η_{sp} والاستهلاك النوعي للحرارة $C_{q_{sp}}$ في المحطة بالعلاقة التالية:

(49.3)

$$\eta_{sp} = 3600 / Cq_{sp}$$

يتضمن الجدول 6.3 قيماً استرشادية للاستهلاك النوعي للحرارة لمحطات الطاقة التكتيفية ذات الاستطاعة الكهربائية P_{el} من 100 حتى 800 MW.

الجدول 6.3 : الاستهلاك النوعي للحرارة Cq_{sp} لمحطات الطاقة التكتيفية. ضغط المكثف 0.04 bar

800	630	400	200	100	[MW] P_{el}
540/250	540/185	540/165	540/125	*540/100	(°C/bar) t_v/p_v
7500	7750	7800	8100	8700	[kJ/kWh] Cq_{sp}

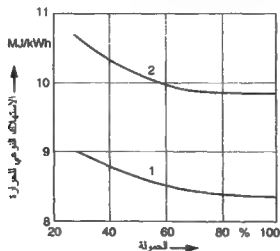
* بدون تجميع وسطي

وللاستهلاك النوعي للبخار تطبيق العلاقة التالية:

(50.3)

$$SVC = 3600 m_v / P_u \quad [kg/kWh]$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار الطازج.



الشكل 12.3 : الاستهلاك النوعي للحرارة Cq_{sp} في العنفة البخارية (1) وفي محطة الطاقة البخارية (2) عند الحمل الجزئية.

بحسب الاستهلاك النوعي للحرارة Cq_T [kJ/kg] للعنفة بدون تجميع وسطي أو معه:
بدون تجميع وسطي:

(51.3)

$$Cq_T = 3600 m_v (h_v - h_{FW}) / P_u$$

مع تجميع وسطي:

$$(52.3) \quad Cq_{T,RH} = 3600 [m_v(h_v - h_{FW}) + m_{RH} \Delta h_{RH}] / P_u$$

حيث: m_v التدفق الكتلي للبخار الطازج [kg/s]

h_v أو h_{FW} الانتالي النوعي للبخار الطازج وماء التغذية [kJ/kg]

m_{RH} التدفق الكتلي للبخار في المحمص الوسطي [kg/s]

Δh_{RM} ارتفاع انتالي البخار في المحمص الوسطي [kJ/kg].

يبين الشكل 12.3 الاستهلاك النوعي للحرارة للمنفعة البخارية (1) ومحنة الطاقة البخارية (2) وذلك تبعاً لنسبة التحميل.

مثال 12.3

ما هي قيمة الاستهلاك النوعي للوقود والحرارة في محطة طاقة تحرق الفحم استطاعتها الكهربائية $P_{el} = 900 \text{ MW}$ إذا كان المردود الإجمالي للمحطة $\eta_{tot} = 0.42$ والقيمة الحرارية الدنيا للفحم الحجري 32 MJ/kg؟

الحل

1. ينتج الاستهلاك النوعي للحرارة من أجل محطة الطاقة من العلاقة:

$$Cq_{sp} = 3600 / \eta_{tot} = 3600 / 0.42 = 8571 \text{ kJ/kg}$$

2. الاستهلاك النوعي للوقود في المحطة:

$$m_F = \frac{Cq_{sp} P_{el}}{LCV} = \frac{2.381 \text{ MJ/MJ} \times 900 \text{ MW}}{32 \text{ MJ/kg}} \\ = 66.97 \text{ kg/s} = 66.97 \times 3.6 = 241.1 \text{ t/h}$$

3. الاستهلاك النوعي للوقود في المحطة

$$sfc = \frac{3600 m_F}{P_{el}} = \frac{3600 \text{ s/h} \times 66.97 \text{ kg/s}}{900} \\ = 0.268 \text{ kg/kWh}$$

7.3 الاستهلاك الذاتي لمحطة طاقة بخارية

يتألف الاحتياج الذاتي للمحطة من طاقة تشغيل المضخات والمراوح ومعدات تصفية (فلتر) غازات الاحتراق ومعدات التغذية بالفحم ونفخ الهباب وسحب الرماد وتشكل طاقه تشغيل المراوح والمضخات جزءاً كبيراً من الاستهلاك الذاتي للمحطة.

تستخدم في المحطات البخارية مراوح لامتصاص الهواء النقي، وهي تسحب الهواء اللازم للاحتراق عبر مسخن الهواء الأولي. للتأثير على عملية الاحتراق يقسم هواء الاحتراق إلى تيارات جزئية (هواء أولي، ثانوي، ثالثي). عند إحراق مسحوق الفحم تقوم مراوح الهواء الأولي بنقل الفحم مع جزء من هواء الاحتراق، والجزء الباقي من هواء الاحتراق يتم سوجه عن طريق مراوح إلى المواقع المطلوبة من حجرة الاحتراق.

تقوم مراوح الامتصاص بتحريك غازات الاحتراق عبر مولد البخار ومعدات التصفية وغازات الاحتراق حتى وصولها إلى المدخنة.

اختيار المضخات

تستخدم في محطات توليد الطاقة أنواع مختلفة من المضخات: مضخة مياه التغذية ومضخات الماء المتكاثف الرئيسية والثانوية، ومضخات ماء التبريد، ومضخات تدوير الماء.. إلخ. مضخات التغذية بالماء (مضخات نابذة متعددة المراحل) تزود مولد البخار بالماء وتشغل بمحركات كهربائية. مضخة التغذية بالماء الرئيسية تُغذى بالحركة عن طريق عنفة بخارية.

يجب على آلة الجريان التي يتم اختيارها تأمين التدفق الحجمي V . العوامل التصميمية لمضخة ما هي: التدفق الحجمي V [m^3/s]، ارتفاع الضخ H [Pa]، درجة حرارة المائع t [$^{\circ}C$]، سرعة الدوران، مردود المضخة η_p ومردود المحرك الذي يديرها η_M .

تُحسب استطاعة تشغيل مضخة من العلاقة التالية:

$$P = \frac{V H}{\eta_p \eta_M} \quad [W] \quad (53.3)$$

القيم الاسترشادية للمرايد η_p بين 0.65 و 0.85 و $\eta_M = 0.9$.

بحسب التدفق كما يلي:

* أو أي نوع آخر من الوقود - المترجم.

(54.3)

$$V = m v \text{ [m}^3/\text{s]}$$

حيث: m التدفق الكتلي للمائع (ماء تغذية المولد، الماء المتكاثف أو ماء التبريد) [kg/s]

v الحجم النوعي [m³/kg].

من أجل مضخة التغذية بالماء تحدد قيمة v للماء عند الضغط ودرجة الحرارة السائدين في خزان الماء.

تستخدم في دورة الماء والبخار مضخات الماء التغذية وللبخار المتكاثف. المضخة النابذية الرئيسية المستخدمة للماء المتكاثف تضخ هذا الماء من المكثف وعمره في مسخن الماء الأولي ذي الضغط المنخفض وتنقله إلى خزان ماء التغذية، ومن هناك يضخ الماء إلى مسخن الماء الأولي ذي الضغط العالي ثم إلى مولد البخار. يتم تصميم مضخة التغذية بالماء بناءً على القواعد المستخدمة في آلات الجريان وعلى حساب دورة عمل الماء والبخار لمحطة الطاقة. في البداية يُحدد خط مقاومة جملة التغذية بالماء وكذلك خط مقاومة مضخة التغذية بالماء عند سرعة الدوران الأعظمية.

يحسب الضغط اللازم لمضخة مياه التغذية p_{iFW} عن طريق الفرق بين ضغط البخار (p_v) عند خرج مولد البخار وضغط الماء (p_{FW}) في خزان ماء التغذية، وبمراعاة ضياعات الضغط في مسخن الماء الأولي ذي الضغط العالي Δp_{PH} وفي مولد البخار Δp_{SG} وفي أنابيب البخار الساحن Δp_{pipe} :

$$(55.3) \quad p_{iFW} = p_v - p_{FW} + \Delta p_{SG} + \Delta p_{PH} + \Delta p_{pipe}$$

يتألف ضياع الضغط من ضياع الضغط بفعل الاحتكاك في الأنابيب المستقيمة ومن مجموع ضياعات الضغط بفعل المقاومات المختلفة. أما ارتفاع الضخ للمضخة فيحسب من العلاقة:

$$(56.3) \quad H = p_{iFW} - H_s - p_{sum} \text{ [Pa]}$$

حيث: p_{iFW} الضغط اللازم للمضخة

H_s ارتفاع الوصول إلى المضخة (محسوباً بالـ Pa)

p_{sum} الضغط الستاتيكي في خزان ماء التغذية.

مثال 13.3

لتحديد استطاعة تشغيل مضخة مياه التغذية معلوم ما يلي:

ماء التغذية: التدفق الكتلي $m_{FW} = 637.4 \text{ kg/s}$ ، درجة الحرارة $t_{FW} = 180^\circ\text{C}$ ، الحجم النوعي $v_{FW} = 0.0010018 \text{ m}^3/\text{kg}$ ، الضغط اللازم للمضخة $p_{iFW} = 318.7 \text{ bar}$ ، الضغط الستاتيكي لخزان

ماء التغذية $p_{\text{stat}} = 11.2 \text{ bar}$ ارتفاع وصول الماء إلى المضخة $H_s = 1.2$ ومردود المضخة η_p يساوي 82 % ومردود المحرك الذي يديرها $\eta_M = 90$ %.

الحل:

ارتفاع الضخ لمضخة مياه التغذية ينتج كما يلي:

$$H = P_{\text{FW}} - P_{\text{stat}} - H_s = 318.7 - 11.2 - 1.2$$

$$= 306.3 \text{ bar} = 30.63 \text{ MPa}$$

الاستطاعة اللازمة لتدوير مضخة مياه التغذية:

$$(53.3) \quad P_{\text{FW}} = \frac{m_{\text{FW}} v_{\text{FW}} H}{\eta_p \eta_H}$$

$$= \frac{637.4 \text{ kg/s} \times 0.0010018 \text{ m}^3/\text{kg} \times 30.63 \text{ MPa}}{0.82 \times 0.9}$$

$$= 26.5 \text{ MW}$$

الجدول 7.3: سرعة الجريان للبخار والماء والغازات

الوسيط	v بالـ m/s
بخار ساخن	60 - 35
بخار مشبع	25 - 15
ماء	2 - 0.5
الغازات	10 - 5

يجوز الجدول (7.3) قيمة استرشادية لسرعة الجريان لكل من البخار والماء والغازات.

اختيار المراوح

تستخدم في محطات الطاقة غالباً المراوح القطرية والمراوح المحورية المتساوية الضغط أو ذات الضغط المرتفع. أهم عناصر تصميم المراوح هي التدفق الحجمي $V [\text{m}^3/\text{s}]$ ، ارتفاع الجر $H [\text{Pa}]$ ، درجة الحرارة $t [^\circ\text{C}]$ ، للمائع، مردود المروحة η_G (بناء على سرعة الدوران) ومردود محرك التشغيل η_M . القيم الاسترشادية لمردود المروحة η_F تتراوح بين 0.7 و 0.8 (تبعاً لسرعة الدوران) وللمحرك التشغيل $\eta_M = 0.9$.

تحسب استطاعة تشغيل مروحة ما كما يلي:

(57.3)

$$P = \frac{V H}{\eta_F \eta_M} \quad [W]$$

بحسب تدفق الهواء النقي للمروحة كما يلي:

(58.3)

$$V = \lambda V_{A,min} m_F (273 + t_A) / 273 \quad [m^3/s]$$

حيث: λ عامل زيادة الهواء

$V_{A,min}$ الاستهلاك الأصغري للهواء من أجل 1 kg وقود $[m^3/kg]$

m_F التدفق الكتلي للوقود $[kg/s]$

t_A درجة حرارة الهواء $[^\circ C]$.

ومن أجل مراوح غازات الاحتراق فإن التدفق الحجمي يحسب من العلاقة التالية:

(59.3)

$$V = m_F [V_{G,L} + (\lambda_G - 1) V_{A,min}] (273 + t_G) / 273 \quad [m^3/s]$$

حيث: $\lambda_{G,L}$ عامل زيادة الهواء لغازات الاحتراق بمراعاة الهواء المتسرب (Leakage)

V_G تدفق غازات الاحتراق بالنسبة لـ 1 kg وقود $[m^3/kg]$

t_G درجة حرارة غازات الاحتراق $[^\circ C]$.

تُحدد قيمة ارتفاع الجر H عن طريق معرفة ضياع الضغط من جهة الهواء أو الغازات لمولد البخار.

الاستهلاكات الأخرى للطاقة

لتغذية المنشأة بالفحم وسحب الرماد منها وكذلك لمعدات تنظيف غازات الاحتراق (الفلتر الكهربائي) يُقدر استهلاك الطاقة وفقاً للخبرات المكتسبة. ويتم حساب الاستطاعة اللازمة لكل التجهيزات المساعدة هذه كما يلي:

(60.3)

$$P_{other} = \sum a P_{el} \quad [W]$$

حيث: a الاستطاعة النوعية اللازمة بالنسبة لـ 1 MW من استطاعة المولدة $[W/MW]$.

يتراوح الاستهلاك الذاتي لمخطة الطاقة البخارية للمعدات المختلفة بالنسبة لاستطاعة المولدة بين

1.5 و 4 % من أجل مضخات التغذية بالماء وبين 0.5 و 2 % لمضخات ماء التبريد وحوالي 0.8 إلى

1.4 % للمراوح ومعدات تنظيف غازات الاحتراق ويبلغ حوالي 0.5 % للتحهيزات الصغيرة الباقية (كالمطاحن... إلخ).

8.3 الطرائق المتطورة للاستفادة من الفحم

الهدف من هذه الطرائق المتطورة هو رفع مردود المحطة الطاقة وتقليل انبعاثات CO_2 والغازات الضارة الأخرى بحيث تبقى التكاليف معقولة.

يمكن ملاحظة تطور المردود من خلال القيم التالية:

— محطات الفحم الحجري تكون القيمة الوسطية 36 %، والهدف المخطط له هو الوصول إلى 45 %.

— محطات الفحم البني القيمة الوسطية 33 % أو 28 % والهدف المخطط له هو الوصول إلى 43 %.

يتم رفع مردود محطة البخار عن طريق:

□ تحسين المردود الداخلي للعتفة بواسطة تحسين عمليات الجريان داخل العتفة.

□ تقليل الضياعات في غازات احتراق مولد البخار.

□ تحسين ما يسمى النهاية الباردة (ضغط المكثف، درجة حرارة ماء التبريد).

□ تقليل الاستهلاك الذاتي للطاقة في المنشأة.

هناك محطات طاقة قيد التشغيل مثل محطة 5 Staudinger ومحطة روسترك Rostock اللتان

تعملان بالفحم الحجري ومردودهما حوالي 43 %، وهناك محطة Schkopau التي تعمل بالفحم البني التي مردودها 40 % وهناك محطات جديدة قيد الإنشاء لحرق الفحم البني هي: Schwarze Pumpe، Flimmersdorf و Lippendorf.

من أجل المحطات التي تحرق الفحم البني وذات الوحدات التي تتراوح استطاعتها بين 600 و 100 MW يمكن أن يصل المردود إلى حوالي 43 % وذلك عن طريق تقليل الاستهلاك الذاتي (للمضخات، لمراوح السحب، لمراوح الهواء النقي، لمعدات سحب الكبريت) بمحدود 1.4 % وتقليل الضياعات في دورة الماء والبخار بمحدود 1.1 % وللنهاية الباردة بحدود 1.4 %، للعتفة البخارية 1.7 %، تحسين الدورة عن طريق التسخين الأولي لماء التغذية بمحدود 1.1 %... إلخ، وبالإجمال حوالي 7%.

* هذه المحطات في ألمانيا - الترجمة.

هناك مواد (معادن) حديثة مثل P 91 تمكن من رفع درجة مواصفات البخار الطازج إلى 270 bar و 580 °C والتحميص الوسطي إلى 50 bar و 600 °C.

ومن الممكن رفع المردود الإجمالي لمحطة الطاقة التي تحرق الفحم إلى 45 % (للمنشآت التي مرحلها من النوع ذي التدوير القسري) وإلى 46 % (للمنشآت التي مرحلها ذو جريان أحادي في الدارة). هذا من أجل الفحم الحجري أما من أجل الفحم البني فيمكن رفع المردود إلى 42 وحتى 43 %.

بتخفيض درجة حرارة غازات الاحتراق حتى 105 °C وتحسين تمرير البخار على شفرات العنففة يمكن رفع المردود حتى 47 % من أجل الفحم الحجري وحتى 45 % من أجل الفحم البني. الجدير بالإشارة أن المحطات ذات البخار الذي مواصفاته دون حدية أي الضغط 160 bar ودرجة الحرارة 530 حتى 540 °C كان مردودها 30 إلى 36 %. من أجل أول محطة طاقة من الجيل الجديد (1991 في Boxberg) ذات الاستطاعة 800 MW للوحدة الواحدة والتي تفوق مواصفات بخارها الشروط الحدية، أي ليخارها الطازج ضغط 260 bar ودرجة حرارة 545 °C والتحميص الوسطي يتم عند 55 bar و 560 °C وضغط المكثف لها 0.046 bar، يبلغ المردود الصافي لهذه المحطة 39 % (مراعاة الاستهلاك الذاتي للطاقة). ويجري الآن بناء أول محطة ذات وحدتين استطاعة كل منهما 800 MW في Schwarze Pumpe.

أما في محطة Lippendorf التي تحرق الفحم البني (الشكل 13.3) فتستخدم وحدات باستطاعة 900 MW للحمولة الأساسية، حيث يبلغ عدد ساعات الاستخدام عند الحمولة الكاملة 6000 إلى 7500 ساعة في العام. للميزات الأساسية لهذه المحطة هي:

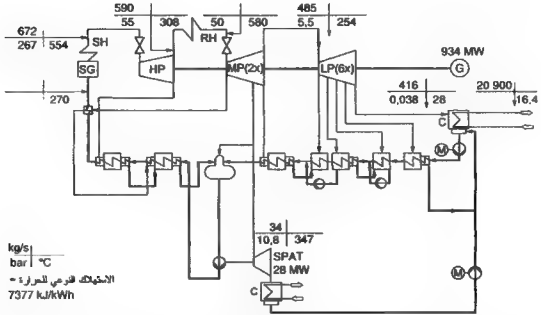
- مجال التحكم يتراوح بين 40 و 100 % من الحمولة.
- تحقيق الحدود المسموح بها لإصدار الغبار و SO_2 ، والانخفاض إلى ما دون الحد المسموح به في إصدار NO_x ، أي أقل من 200 mg/m^3 عند O_2 6 %، وذلك عن طريق استخدام إجراءات أولية في الاحتراق.

- سحب أكاسيد الكبريت وإنتاج الجص (الجبصين).
- تغليف غاسل غازات الاحتراق بمخلوط أساسها Ni-Ba واختيار GfK لأقنية الغاز المنظف.
- تمرير غازات الاحتراق حول أبراج تبريد ذات سحب طبيعي.
- توليد غازات الاحتراق حول أبراج تبريد ذات سحب طبيعي.

□ توليد البخار بتحميص وسطي، وتتمتع البخار بمواصفات فوق حدية.

□ تحقيق الاستطاعة المطلوبة مع تحكم يحقق تدرجاً في الضغط.

تستخدم لتوليد البخار مراحل ذات جريان قسري أحادي في الدورة ارتفاعها 163 m (مراحل برجية)، أما المجرى الثانسي فهو خالٍ.



الشكل 13.3 : مخطط الجريان في محطة Lippendorf، مولد بخار، SH محمص، RH محمص وسطي، HP عنفة الضغط العالي، MP عنفة الضغط المتوسط، LP عنفة الضغط المنخفض، عنفة تشغيل مضخات المكثف ومضخات مياه التغذية، C مكثف.

تقانة الإحراق الأمثل للفحم البني

حتى عام 1997 أمكن رفع المردود لـ 70 % من المحطات ذات الاستطاعات العالية التي تحرق البني الموجودة* بمردود 3.5 %، وبذلك تم إنقاص انبعاث الـ CO_2 بمقدار مليوني طن في العام. وفي عام 1999 كان من المفترض أن تبدأ محطة ذات تقانة حديثة (وحدة توليد واحدة) في Frimmersdorf تحرق الفحم البني واستطاعتها 900MW، وبذلك سيرتفع المردود وسطياً من 30%*

* في ألمانيا - المترجم.

إلى 43 %، وسيكون انبعاث الـ CO_2 أقل بـ 2.1 مليون طن في السنة، تتضمن التقانة الحديثة هذه ما يلي:

□ رفع مواصفات البخار الطازج من $170 \text{ bar}/530^\circ\text{C}$ (دون حدي) إلى 260 حتى 285°C و 580°C (فوق حدي).

□ تخفيض ضغط المكثف حتى 0.034

□ استخدام الطرق الأفضل لجريان البخار وتمده في العنفة البخارية

□ الاستخدام الأنسب لحرارة غازات الاحتراق عن طريق جعل المبادلات الحرارية، وهناك جملتان اثنتان موصولتان على التوازي، الأولى لتسخين ماء التغذية (ECO) والأخرى بعد المصفاة الكهربائية مصنوعة من خيوط صناعية لتسخين هواء الاحتراق تسخيناً أولياً

□ التخفيض الكبير للاستهلاك الذاتي للطاقة عن طريق أنسب اختيار للعناصر المختلفة ووصلها. وبالمقارنة مع محطات الطاقة القائمة التي تحرق الفحم البني فقد بُنيت بالاستعانة بالتقانة السابقة الذكر وحدات توليد تحرق الفحم باستطاعة صافية قدرها 900 MW وتتمتع بالمقارنة مع الوحدات ذات الاستطاعة 600 MW بمردود أعلى بمقدار 7.7 % أي حوالي 43 %.

المواصفات التصميمية للوحدة ذات الاستطاعة 900 MW في Neurath مبينة في الجدول (8.3).

الجدول 8.3: المواصفات الفنية لوحدة توليد تحرق الفحم البني استطاعتها 880 MW.

1. الوقود

الفحم البني بتركيب (كسب وزنية [%]) كما يلي: $C = 29.4$ ، $H = 2.2$ ، $O = 10.6$ ، $S = 0.4$ ،
 $LCV = 9700 \text{ kJ/kg}$ ، $W = 52.4$ ، $A = 4.6$ ، $N = 0.4$ ،
 غازات الاحتراق (كسب حجمية %) عندما $\lambda = 1.15$ هي $\text{CO}_2 = 20.51$ ، $\text{O}_2 = 2.45$ ،
 $\text{N}_2 = 61.22$ ، $\text{H}_2\text{O} = 14.7$

2. مولد البخار (SG، مارجل بنسون Benson)

استطاعة الاحتراق 1723 MW، استطاعة الحرارية لمولد البخار 1600 MW
 مردود مولد البخار $\eta_{SG} = 1600 \text{ MW} / 1732 \text{ MW} = 92.38\%$
 البخار الطازج للمولد: $m_v = 3334 \text{ t/h}$ ، $p_1 = 260 \text{ bar}$ ، $t_1 = 550^\circ\text{C}$
 الضغط قبل مولد البخار 311.2 bar، ضياع الضغط 51.2 bar.
 التحميص الوسطي عند $p = 46.5 \text{ bar}$ و $t = 580^\circ\text{C}$

3. جلة العنفة والمولد (Turboset)

العنفة: واحدة ذات ضغط عالٍ HP، واحدة ذات ضغط متوسط MP، 6 مراحل ذات ضغط منخفض LP.

الاستطاعة الميكانيكية المفيدة 894.3 MW.

المردود الداخلي للعنفة $\eta_{IT} = 0.926$.

الاستطاعة الكهربائية لخرج المولدة 880 MW.

الاستهلاك الذاتي للطاقة 44.6 MW.

الاستطاعة الكهربائية الجاهزة (الصافية) $P_{Netto} = 835.4$ MW.

المردود والاستهلاك النوعي للحرارة في المنشأة (منسوباً لـ P_{Netto})

$$Cq_{sp} = 8416.4 \text{ kJ/kWh}, \eta_{el} = 42.78 \%$$

5. الاستهلاك الذاتي للطاقة في المنشأة

مضخة مياه التغذية 26.6 MW، مروحة الهواء النقي 4.9 MW، مرلوح امتصاص غازات الاحتراق

8.1 MW المطحنة 7.5 M.

6. التسخين الأولي لماء التغذية

هناك 4 مسخحات أولية عند ضغط منخفض من أجل تدرج قدره 3 K، خزان لماء التغذية، ساحب

غازات، مسخخان اثنان أوليان عند ضغط عالٍ (A6) من أجل تدرج قدره 1.8K و A7 من أجل

تدرج قدره 2K، ساحب للحرارة مركب ومصمم لضمان الوصول إلى درجة الحرارة 270 °C

لماء التغذية عند مدخل المرجل.

7. التكثف وبرج التبريد

الاستطاعة الحرارية المطروحة 952.7 MW، ضغط المكثف 34.2 mbar، نسبة الجفاف للبخار

المغادر للعنفة $X_{cond} = 0.884$ هناك برجاً تبريد ارتفاع كلي منهما 162 m بحال التبريد 9 K،

عرض مناطق التبريد 8.16 K، التدفق الكتلي لماء التبريد $m_{CW} = 27876 \text{ kg/s}$ ، تدفق الهواء الكتلي

$m_A = 27926 \text{ kg/s}$ ، التدفق الكتلي للبخار المتطاير $m_{eva} = 259 \text{ kg/s}$ عند درجة حرارة محيطية

$$t_{amb} = 9.5^\circ\text{C}$$

الخلاصة

يمكن رفع مردود دورة البخار عن طريق زيادة درجة الحرارة الوسطية لتقلدتم الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة. يتم تحقيق ذلك هندسياً عن طريق رفع الضغط P_v ودرجة الحرارة T_v وكذلك عن طريق استخدام التخميص الوسطي والتسخين المتجدد كثير المراحل للماء الذي يغذي المرجل. درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة هي درجة حرارة التكاثف التي تتحدد عن طريق ضغط المكثف ودرجة حرارة ماء التبريد فيه.

إن رفع P_v يرفع المردود الحراري ولكنه يؤدي إلى ازدياد استطاعة تشغيل مضخة مياه التغذية. يمكن عن طريق رفع درجة حرارة البخار المولّد ودرجة حرارة التخميص (T_v, t_{RH}) وكذلك عن طريق الانتقال من التخميص الأحادي إلى التخميص في مرحلتين رفع المردود الحراري بمقدار 1.2 إلى 2%.

إن الجريان الأمثل للبخار في العنفة شرط مهم لزيادة إضافية للمردود الداخلي للعنفة وبالتالي المردود الإجمالي لمحطة الطاقة. كذلك يساهم تقليل الاستهلاك الذاتي للطاقة في المنشأة نفسها بشكل جوهري في رفع المردود الصافي للمحطة. يكون التحسن في استغلال طاقة الوقود كبيراً فقط عند استخدام محطة الدارة المركبة (بخارية + غازية). تقع قيم المردود التي يمكن الوصول إليها في المجال 58 إلى 60 %، وستتم في الفصول القادمة معالجة فرضيات هذه المحطات المبتكرة التي تعمل بالوقود المستحاثي (الأحفوري) إذا أمّا تمثل جيلاً جديداً من محطات الطاقة التي هي في انتشار متزايد.

4 مولدات البخار (المراجل - الغلايات)

1.4 الأنواع

المرجل ومولد البخار

تقسم المراجل (الغلايات) ومولدات البخار بشكل عام إلى:

— المراجل ذات الحيز الكبير للماء.

— مولدات البخار الأنبوبية.

تصنع المراجل ذات الحيز الكبير للماء على شكل مراجل ذات أنابيب هب وغازات احتراق، وباستطاعة تصل حتى 25 t/h وضغط البخار المشبع حتى 25 bar. إن نسبة كمية الماء في المرجل إلى التدفق الكتلي للبخار المولد عالية جداً، وتمتلك هذه المراجل قدرة كبيرة على التخزين. وعند تغير الحمولة تحصل تغيرات صغيرة في الضغط. يمكن رفع درجة حرارة البخار حتى 450 °C وتحميصه بواسطة عمص خاص. تستخدم هذه المراجل عادة في المنشآت الصناعية والحرفية.

أما في محطات الطاقة فتستخدم مولدات البخار الأنبوبية حصراً. ويمكن تصنيعها لتقدم أعلى الاستطاعات وأكبر القيم للضغط ودرجات حرارة البخار. يتم في هذه المولدات توليد البخار في أنابيب المبخر التي تشكل جدار وحزمة التسخين في المولد.

تقسم مولدات البخار الأنبوبية إلى مولدات ذات تدوير طبيعي وذات تدوير قسري وذات جريان وحيد قسري.

مولدات البخار ومنشأة مولدة البخار

يتألف مولد البخار من حجرة احتراق وسطوح تسخين لتوليد البخار وتحميصه وكذلك للتسخين الأولي لكل من ماء التغذية والهواء، أي من مبخر وعمص وعمص وسطي وحاقن ماء تبريد البخار، والموفر (Eco) ومسخن الهواء الأولي. يمكن توزيع مولد البخار في عدة مجارٍ على طول مجرى الغازات، وهناك نوع ذو مجرى واحد وأنواع ذات مجارٍ متعددة. يتم ترتيب المولدات

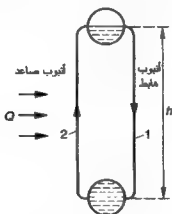
ذات الجريين بحيث يوجد في الجرى الأول حجرة احتراق يشكل المبخر جدارها الفشائي (membrane) وتحوي أيضاً محمضاً ذا ضغط عالٍ، أما في الجرى الثاني فتوجد سطوح التسخين

الأخرى للتسخين اللاحق.

تتضمن منشأة البخار بالإضافة إلى مولد البخار الأجزاء التالية:

- تجهيزات تخضير وتوزيع الوقود،
- مراوح الهواء النظيف ومراوح السحب،
- المسخنات الأولية للماء (المفورات) في مجرى غازات الاحتراق للمولد،
- مضخات ماء التغذية، والملحقات وأنابيب الماء،
- تجهيزات تخفيض الضغط وكذلك أنابيب التوصيل إلى مولد البخار،
- معدات سحب أكاسيد الكبريت والآزوت،
- المدخنة.

ويؤثر نوع الوقود المستخدم على شكل المنشأة وتصميمها وعملها بشكل كبير.

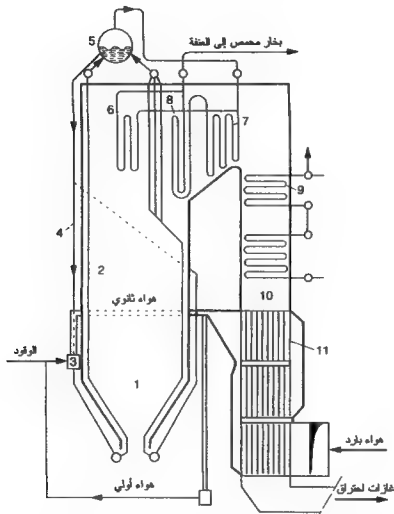


الشكل 1.4 : دورة الجريان في مولد البخار ذي التدوير الطبيعي (تخطيطاً).

مولدات البخار ذات التدوير الطبيعي

تنشأ في هذه المولدات الحركة الدورانية للماء بفعل فرق الكثافة بين الماء الساخن والماء البارد، وتعاود قوة التدوير هذه مقاومة الجريان داخل الدورة. تتألف دورة العمل من أنابيب صاعدة مسخنة وجمع توزيع، وأسطوانة (حالة) وأنابيب هابطة غير مسخنة (الشكل 1.4) يتبخّر الماء جزئياً في الأنابيب الصاعدة ثم يخرج خليط الماء والبخار من الأنابيب الصاعدة ليذهب إلى الأسطوانة

(الحلة)، وهناك يفصل الماء عن البخار. يجري البخار إلى الخميص، أما الماء فينتقل عبر الأنابيب الهابطة إلى المجمعات ومنها يتوزع على أنابيب المبخر الصاعدة.



الشكل 2.4 : أجزاء مولد

البخار ذي التدوير

الطبيعي

1. حجرة الاحتراق

2. المبخر

3. المحرق

4. الأنابيب الهابطة

5. الأسطوانة (الحلة)

6. مجمعات بالإشعاع

7. مجمعات بالتلامس

8. مجمعات وسطية

9. موثر

10. مجرى الغاز حيث للتبادل

بالحمل

11. مسخن أولي للهواء

تكون كثافة خليط الماء والبخار في الأنابيب الصاعدة التي تشكل المبخر، أقل من كثافة الماء في الأنابيب الهابطة. إن قوة التدوير منسوبة لـ 1 m^2 من مقطع الأنبوب تساوي ضياع الضغط في الدورة وهي تحسب بالعلاقة التالية:

$$\Delta p = g (\rho_F - \rho_S) H \quad [\text{Pa}] \quad (1.4)$$

حيث: g التسارع الأرضي $[\text{m/s}^2]$

ρ_F كثافة الماء في الأنابيب الهابطة $[\text{kg/m}^3]$

البخار ذو التدوير القسري، بمرجل لامونت La-Mont وهو يستخدم بشكل كبير في أمريكا ولكنه نادر الاستخدام في أوروبا وبخاصة ألمانيا. تُدعم حركة الوسيط في أنابيب المبخّر لهذا النوع من المولدات عن طريق مضخة تدوير للماء وتتم تهدئة الجريان في أنابيب المبخّر المختلفة بمساعدة صمامات خنق.

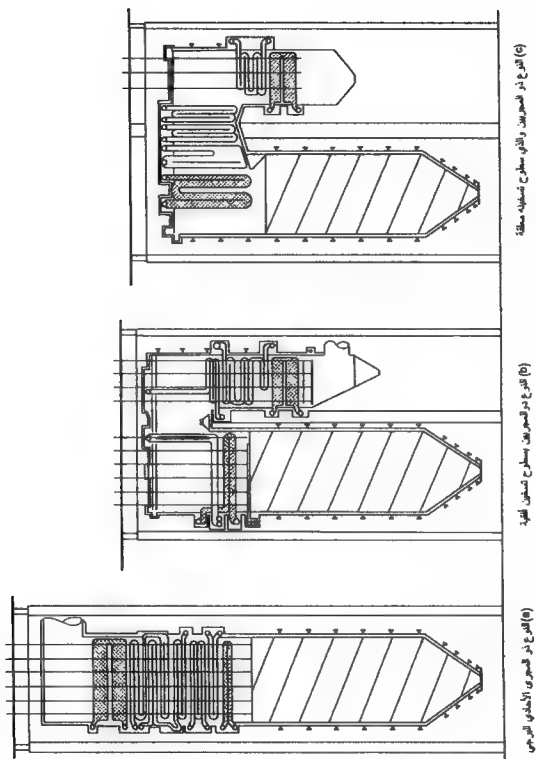
وبفضل مضخة تدوير الماء تصبح كثافة التدفق الكتلي عبر المبخّر مستقلة عن استطاعة مولد البخار. تقوم صمامات الخنق علّوة على ما ذكر بالموازنة بين التدفق الكتلي للماء والتيار الحراري للأنابيب. ويمكن باختيار مناسب للتدفق الكتلي تحاشي نشوء أزمة الغليان عند الضغوط العالية تحت الحدية. يتم تنظيم عمل جملة تدوير الماء بحيث يتراوح عدد الدورات بين 3 و5. ويجري اختيار كثافة التدفق الكتلي في أنابيب المبخّر وفقاً لكثافة السائلة الحرارية القصوى في حجرة الاحتراق وللضغط، ويُختار قيمة كثافة التدفق الكتلي في أنابيب المبخّر لتتراوح بين 1000 و2000 kg/m²s.

يبلغ الضغط المسموح به في أسطوانة الفصل (الحلّة) لمولدات البخار ذات التدوير القسري حوالي 200 bar.

مولدات البخار ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة وبشكل قسري

هنالك نوعان من هذه المولدات هما: مولد بخار سولزر Sulzer ومولد بخار بنسون Benson. يتميز مرجل بنسون بأنه ذو مجرى وحيد وبوجود ساحب للرماد الجاف وكذلك بسرعة إقلاعه، ويمكنه العمل عند ضغط أعلى أو أدنى من الضغط الحدي. في المجال الأدنى من الضغط الحديّ يتعلق موقع نقطة نهاية التبخير بمحمولة المرجل والحرارة المتلقاة، وكذلك بإنتالي الدخول ودرجة حرارة البخار الحار. وهكذا تمسب المساحات المتغيرة لسطوح التسخين لكل من المبخّر والمحمص. تنظم نقطة التبخير عبر جزء انتقالي صغير يتم تسخينه (مبخّر غائي) وبذلك يمكن التشغيل عند أية درجة حرارة خروج للغازات. كما يمكن عند الحاجة تشغيل مرجل بنسون عند مختلف الضغوط، أي أنه مناسب للعمل عند تغير متدرج في الضغط. في مولدات البخار من نوع سولزر يستخدم فاصل للماء.

من أجل مولدات البخار ذات الجريان لمرة واحدة في الدورة وبشكل قسري يُسخن ماء التغذية أولاً في مسخن ماء أولي يستخدم غازات الاحتراق الساخنة (الموفر economizer). يتبخّر الماء في



الشكل 4.4 : مراحل بنسبون ذات الجريان القسري لمرة واحدة في الدورة بأنواعها أحادية وثنائية المجرى.

مبخر تتوضع أنابيبه بشكل حر وبسيط نسبياً على جدران حجرة الاحتراق. وهكذا يتم تحويل مستمر للماء إلى بخار عند أعلى الضغوط (حتى 350 إلى 400 bar أخيراً يُسخن البخار في محمص ذي ضغط عالٍ ريثما يصل إلى درجة حرارة البخار الطازج المطلوبة. تتعلق درجة الحرارة هذه بمادة صنع كل من المحمص وأنابيب البخار الطازج وشفرات العنف، وهي تقع حالياً بمحدود الـ 560 °C. إن ضغط البخار في هذا النوع من مولدات البخار غير محدود من وجهة النظر الفيزيائية ولذلك يُستخدم هذا النوع من المولدات حصراً للضغط التي قيمتها أعلى من الضغط الحدي. هناك حولة دنيا لا يجوز النزول عنها وذلك لضمان التدفق الكتلي الأصغري اللازم لتبريد الأنابيب ولتأمين استقرار الجريان، وهذا عيب مولدات البخار ذات الجريان مرة واحدة في الدورة وبشكل قسري، إلا أنه يمكن تخاشي هذه المشكلة بتركيب معدات خاصة من أجل الإقلاع والحمولات الصغيرة. الشكل (4.4) يبين بشكل تخطيطي أنواع مولدات البخار هذه بتصميمها ذات الجرى الوحيد أو ذات الجريين. كذلك يبين الجدول (1.4) مقارنة لحجوم هذه المولدات.

الجدول 1.4: مقارنة حجوم مولدات البخار ذات الجريان القسري مرة واحدة في دورة المبخّر (الوقود فحم بنسي)

استطاعة المجموعة MW	عدد المراحل	معدل توليد البخار لكل مرحلة t/h	الارتفاع الكلي m	ارتفاع حجرة الاحتراق
500	2	815	73	42
600	1	1800	130*	66
930	1	2420	163	103

* الارتفاع الكلي لمولد البخار الذي استطاعته MW 630 والذي يستخدم لوقود السائل (فول أويل) يبلغ 70 m نقط.

مقارنة الأنواع المختلفة لمولدات البخار

عيوب المولدات ذات التدوير الطبيعي:

- حدود ضغط البخار هي 180 bar.
- تكاليف الأسطوانة (الحلّة) عالية من أجل الاستطاعات والضغط الكبير، فمثلاً يجب أن تتراوح سماكة جدار الأسطوانة بين 150 و 200 mm.
- السلوك الديناميكي غير مناسب.

يعرض الجدول (2.4) مجالات الضغط عند مخرج المبخّر وقبل العنفة والتي تناسب عملياً للاستعمال في الأنواع المختلفة من مولدات البخار.

الجدول 2.4: مجالات الضغط عند مخرج المبخّر وقبل العنفة لمختلف طرق توليد البخار

نوع مولد البخار	ضغط الخروج من المبخّر [bar]	ضغط البخار الطازج [bar]
المولدات ذات التدوير الطبيعي	180	160
المولدات ذات التدوير القسري	195	170
المولدات ذات الجريان القسري لمرة واحدة في الدورة والمزودة بفاصل للماء	210	185
المولدات ذات الجريان القسري لمرة واحدة في الدورة غير المزودة بفاصل للماء	فوق حدي (>221.2bar)	فوق حدي (>221.2bar)

2.4 الموازنة الحرارية والمردود

تيار الحرارة الداخل

تتألف كمية الحرارة الناتجة عن حرق الوقود من الحرارة الناتجة عن الارتباط الكيميائي والحرارة المحسوسة للوقود وحرارة المحسوسة لهواء الاحتراق. يُحسب تيار الحرارة المتحررة في حجرة الاحتراق بالمعادلة التالية:

$$Q_s = m_F [LCV + c_F (t_F - 25) + A c_{pA} (t_A - 25)] \quad [\text{kJ/s}] \quad (2.4)$$

حيث: m_F التدفق الكتلي للوقود [kg/s]

LCV القيمة الحرارية للوقود [kJ/kg]

c_F السعة الحرارية النوعية للوقود [kJ/kgK]

c_{pA} السعة الحرارية النوعية للهواء [kJ/m³K]

t_F و t_A درجة حرارة الوقود وهواء الاحتراق على التوالي [°C]

A كمية هواء الاحتراق المقابلة لكل 1 kg وقود [m³/kg].

تعتمد الدرجة 25 °C كدرجة حرارة مرجعية للموازنة الحرارية. إذا لم يسخن الوقود أو الهواء قبل الاحتراق ينعدم الحدان الثاني والثالث في المعادلة 2.4.

استطاعة البخار والاستطاعة الحرارية المفيدة

تعرف استطاعة البخار لمولد بخار بأنها كمية البخار التي يتم إنتاجها في واحدة الزمن ويُرمز لها بـ m_v وواحداتها [kg/s] أو [t/h] (طن/ساعة)
أما الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_u لمولد بخار فهي مجموع كميات الحرارة المقدمة في الثانية لتوليد البخار (Q_v) ولتحميصه الوسطي (Q_{RH}):

$$(3.4) \quad Q_u = Q_v + Q_{RH} \quad [\text{kJ/s}]$$

في المنشآت الكبيرة تضبط درجة حرارة البخار الطازج (عند مخرج مولد البخار) عن طريق حقن جزء من مياه التغذية لتبريد البخار.

تبلغ الحرارة اللازمة لتوليد البخار من مياه التغذية (FW) كما يلي:

$$(4.4) \quad Q_v = m_v (h_v - h_{FW}) + m_{iW} (h_{FW} - h_{iW}) \quad [\text{kJ/s}]$$

أما الحرارة اللازمة لتحميص الوسطي للبخار فهي:

$$(5.4) \quad Q_{RH} = m_{RH} (h_{RH,exit} - h_{RH,ent}) + m_{W,RH} (h_{FW} - h_{W,RH}) \quad [\text{kJ/s}]$$

حيث: m التدفق الكتلي [kg/s]

h الانتالي النوعي [kJ/kg].

أما الدلائل فتعني ما يلي: v بخار نقي، RH تحميص وسطي، FW ماء التغذية، iW الماء المحقون لتبريد البخار الطازج، W,RH الماء المحقون لتبريد البخار المحمص وسطياً، ent للدخول، $exit$ للخروج.

مردود مولد البخار

يعرف مردود مولد البخار η_{SG} بأنه النسبة بين الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_u للمولد وتيار الحرارة الداخلة إليه Q_2 :

$$(6.4) \quad \eta_{SG} = Q_u / Q_2$$

وبطريقة غير مباشرة:

$$(7.4) \quad \eta_{SG} = (Q_3 - Q_{loss}) / Q_2 = 1 - Q_{loss} / Q_2$$

تتألف الضياعات الحرارية الإجمالية لمولد البخار Q_{loss} من الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق Q_{EG} والضياع الحراري بفعل عدم الاحتراق الكامل Q_{Lim} ، والضياع الحراري بسبب الأجزاء غير المحترقة من الوقود Q_{FS} (كمية الكربون في الوقود) والتي تتطاير مع الهباب أو ترسب مع الخبث، والضياع الحراري بفعل الحرارة المحسوسة للخبث Q_s ، والضياع بفعل الحمل والإشعاع Q_c .

عن نسب هذه الضياعات الحرارية بعد قسمتها على الحرارة المضافة هي (كنسبة مئوية %):
 $q_G, q_s, q_{FS}, q_c, q_G$

ويحسب المردود الحراري للمولد كما يلي:

$$(8.4) \quad \eta_{PG} = 100 - (q_G + q_s + q_{FS} + q_c + q_G) \quad [\%]$$

تزيد قيمة المردود الحراري للمولدات الحديثة ذات الاستطاعات الكبيرة عن 90 %.

الضياع الحراري مع غازات الاحتراق

يتعلق الضياع الحراري مع غازات الاحتراق بدرجة الحرارة t_G والتدفق الحجمي للغازات V_{Gas} .
 يحسب التدفق الحجمي للغازات كما يلي:

$$(9.4) \quad V_{\text{Gas}} = m_F (V_{\text{EG}} + \Delta \lambda A_{\text{min}}) \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

حيث: m_F استهلاك الوقود في حجرة الاحتراق $[\text{Kg/s}]$

V_{EG} حجم الغازات في حجرة الاحتراق $[\text{m}^3/\text{kg}]$

$\Delta \lambda$ عامل الإغناء بالهواء بفعل ما يسمى السحب (الامتصاص) الخاطئ للهواء بعد حجرة الاحتراق

A_{min} كمية الهواء الدنيا اللازمة نظرياً لحرق 1 kg وقود $[\text{m}^3/\text{kg}]$.

ويصبح الضياع الحراري مع غازات الاحتراق (عند درجة حرارة مرجعية للوسط المحيط هي 25°C) كما يلي:

$$(10.4) \quad Q_{\text{EG}} = V_{\text{Gas}} c_{PG} (t_c - 25) \quad [\text{kJ/s}]$$

الضياع الحراري بفعل الاحتراق غير الكامل للوقود

عندما يكون الاحتراق غير كامل فإن غازات الاحتراق تحوي غازات قابلة للاحتراق (CO، حبيبات كربون) ويبلغ الضياع الحراري الناتج عن ذلك:

(11.4)

$$Q_u = V_{Gas} - r_{CO} m_F H_{CO} R_{Gas}/R_{CO} \text{ [kJ/s]}$$

حيث: V_{Gas} حجم الغازات المنطلقة من احتراق 1 kg وقود [m³/kg]

m_F استهلاك الوقود [kg/s]

r_{CO} نسبة حجم غاز CO في غازات الاحتراق [m³/m³]

H_{CO} القيمة الحرارية لـ CO (12640 kJ/m³)

R_{Gas} ثابت غازات الاحتراق [kJ/kg K]

R_{CO} ثابت غاز الـ CO

$$0.2968 \text{ kJ/kg} = K$$

الضياح الحراري بسبب عدم الاحتراق

يمكن حساب الضياح الحراري جراء عدم الاحتراق في كل من الرماد المتطاير والخبث المترسب كما يلي:

(12.4)

$$Q_{FS} = A m_F C_{FS} H_C$$

حيث: A محتوى الوقود من الرماد [kg/kg]

C_{FS} محتوى كل من الرماد المتطاير والخبث المترسب للكربون

H_C القيمة الحرارية للكربون (33285 kJ/kg).

الضياح الحراري بالحرارة المحسوسة للخبث الصلب أو السائل المطروح:

(13.4)

$$Q_{sen} = A m_F a (c_s t_s + h_s)$$

حيث: a النسبة الكتلية للخبث المسحوب (المطروح)

c_s السعة الحرارية النوعية للخبث (بين 0.8 و 1.26 kJ/kg K)

t_s درجة حرارة الخبث [°C]

h_s انتالي الخبث المنصهر (السائل) (قيمته تتراوح بين 200 و 420 kJ/kg).

ويمكن إهمال هذا الضياح Q_s في حالة الإحراق الجاف.

الضياح الحراري بفعل التبريد

يحسب الضياح الحراري بفعل تبريد السطح الخارجي للمولد جراء الحمل والإشعاع كما يلي:

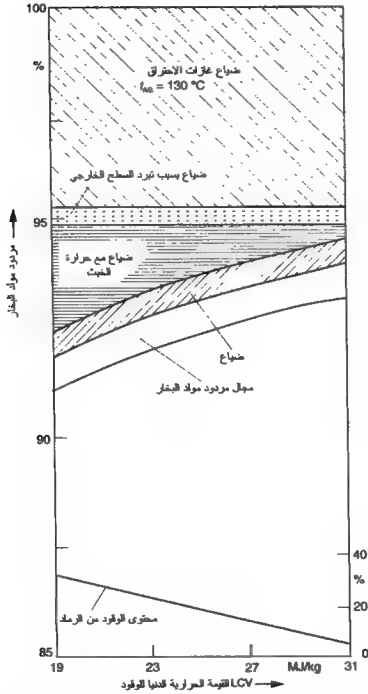
(14.4)

$$Q_C = (a_{\text{ex}} + a_{\text{rad}}) A_{\text{out}} (t_{\text{out}} - 25) \text{ [kJ/s]}$$

حيث: a_{rad} ، a_{ex} عاملا انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع على التوالي [W/m² K]

A_{out} مساحة السطح الخارجي للمولد [m²]

t_{out} درجة حرارة السطح الخارجي للمولد [°C].



الشكل 5.4 : الضياعات الحرارية ومردود مولد بخار يحرق الفحم الحجري وعلاقة ذلك بالقيمة الحرارية الدنيا للوقود LSV.

بازدياد الاستطاعة الحرارية المفيدة لمولد البخار تتناقص قيمة $q_c = Q_2/Q_3$ من 1.1 % عند $Q_2 = 10 \text{ MW}$ إلى 0.3 % عند $Q_2 = 800 \text{ MW}$ وذلك من أجل مرجل يحرق فحمًا حجرياً. يبين الشكل (5.4) الضياعات الحرارية والمردود لمولد بخار يحرق الفحم الحجري وذلك تبعاً للقيمة الحرارية الدنيا للوقود.

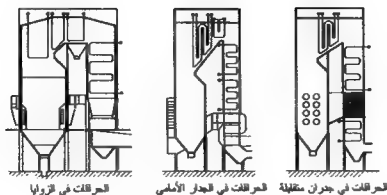
3.4 الاحتراق والحراقات

وفقاً لنوع الوقود فإن هناك أنواعاً مختلفة للحراقات ولأسلوب الحرق في مولد البخار. يتم في فرن مولد البخار حرق أنواع مختلفة من الوقود الصلب والسائل والغازي. إن طريقة الحرق وحجم حجرة الاحتراق يتعلقان بنوع الوقود وهما أساسيان في جودة الاحتراق.

! **حرق قطع الفحم تستخدم المصبعات والحبيبات مسحوق الفحم الناعمة تستخدم أجهزة حرق ذات تفريغ الخبث بالحالة الجافة أو تستخدم الأفران السيكلونية ذات تفريغ الخبث بالحالة السائلة، أما من أجل حبات الفحم الأكبر حجماً فتستخدم طريقة الحرق بما يسمى فرشاة الوقود السائلة.**

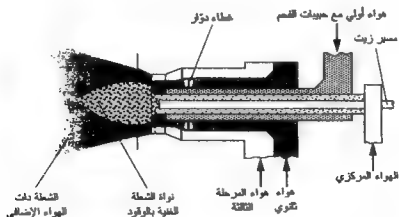
يُحمل الفحم المطحون في مطاحن الفحم عن طريق هواء أولي ريثما يوزع على عدة طرقات. تسحب الكميات الباقية من الاحتراق (الرماد والخبث) من حجرة الاحتراق أو تفصل عن غازات الاحتراق على شكل رماد طيار بواسطة معدلات تصفية (فلتر) خاصة. يوضح الشكل (6.4) تخطيطاً لأنواع حجر الاحتراق ذات سحب الخبث بالحالة الجافة، أما الشكل (7.4) فيبين بشكل تخطيطي حرقاً للفحم المسحوق يرسل إليه الهواء عبر ثلاث مراحل. يحرق الوقود السائل سواءً الثقيل (فيول أويل) أو الخفيف (غاز أوليل — مازوت) في حراقات تعتمد على تدوير الوقود أو تغويزه (تحويله إلى غاز). من أجل الوقود السائل الثقيل وعندما يكون أسلوب الحرق غير مناسب يمكن أن تنشأ كمية من الغبار المتطاير على شكل خليط من الهباب والكربون والرماد.

* المصطلح الإنكليزي للقبال لتسمية (Wirbelschichtfeuerung) الألمانية هي (Fluidized bed combustion) وترجمة المصطلح الإنكليزي إلى العربية (الاحتراق في فرشاة الوقود للمبة)، أما ترجمة المصطلح الألماني فهي (الاحتراق في فرشاة الوقود ذات الحركة التوافقية).



الشكل 6.4 : أنواع حرق الاحتراق ذات سحب الحث بالحالة الجافة.

لإحراق الوقود الغازي، مثلاً الغاز الطبيعي، تستخدم حراقات غاز (في المنشآت الكبيرة حراقات ذات ضغط عالٍ) تحقق إحراقاً بدون مخلفات وقليل من المركبات الضارة.



الشكل 7.4 : حراق مسحوق الفحم.

تحديد مواصفات حجرة الاحتراق

يجب تحديد أبعاد حجرة احتراق مولد البخار بحيث يمكن الحصول على احتراق كامل للوقود عند مختلف ظروف التشغيل، وهذا يعني عند استخدام الفحم البنى والحجري وجرد حجم كاف لأجزاء الفحم يسمح بالاحتراق الكامل. يجب أن تُختار درجة الحرارة في منطقة الحزام المحيط بالحراقات بحيث لا يتجمع الحث على جدران حجرة الاحتراق. ولتخاشي التصاق الرماد الذائب على سطوح التسخين يجب أن تكون درجة الحرارة النهائية لحجرة الاحتراق أدنى من درجة حرارة ذوبان الرماد.

استطاعة حرارة الاحتراق هي كمية الحرارة التي تقدم إلى حجرة احتراق مولد البخار مع الوقود وهواء الاحتراق خلال ثانية:

$$(15.4) \quad Q_F = m_F (LCV + \lambda A_{\min} c_{pA} t_A) \quad [\text{MW}]$$

حيث: m_F تدفق الوقود الكتلي $[\text{kg/s}]$

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود $[\text{kJ/kg}]$

λ عامل فائض الهواء

A_{\min} كمية الهواء الدنيا اللازمة لإحراق الوقود $[\text{m}^3/\text{kg}]$

c_{pA} السعة الحرارية لوحدة الحجم من الهواء $[\text{kJ/m}^3 \text{ K}]$

t_A درجة حرارة الهواء $[\text{°C}]$.

ومن أجل الحساب التقريبي لحجرة الاحتراق يجب معرفة المقادير المميزة التالية:

التحميل الحجمي q_V ، التحميل السطحي q_A ، والتحميل في الحزام المحيط بالحراقات q_G ،

وتعريفها كما يلي:

□ التحميل الحجمي هو نسبة استطاعة حرارة الاحتراق Q_F إلى حجم حجرة الاحتراق.

$$(16.4) \quad q_F = Q_F / V_F \quad [\text{MW} / \text{m}^3]$$

□ التحميل السطحي هو نسبة Q_F إلى مقطع حجرة الاحتراق:

$$(17.4) \quad q_A = Q_F / A_F \quad [\text{MW} / \text{m}^2]$$

□ التحميل في الحزام المحيط بالحراقات هو نسبة Q_F إلى مساحة السطح الخارجي للمحدار في مجال

تركيب الحراقات A_G :

$$(18.4) \quad q_G = Q_F / A_G \quad [\text{MW} / \text{m}^2]$$

تحدد قيمة q_V فترة تواجد الوقود في حجرة الاحتراق ومدى اكتمال احتراقه، أما q_A فتحدد

سرعة غازات الاحتراق والقيمة q_G تحدد درجة حرارة الشعلة (اللهب). من أجل مولدات البخار

التي تحرق الفحم الحجري تتراوح q_G بين 1 و 1.2 MW/m^2 ، وللفحم البني تتراوح بين 1.2 و

1.5 MW/m^2 .

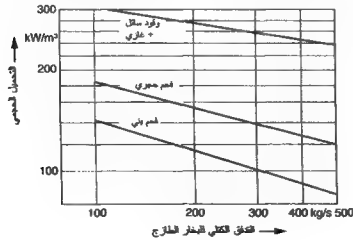
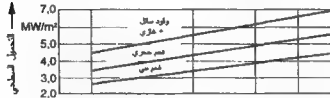
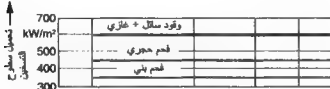
الجدول (3.4) يعطي قيماً استرشادية لـ q_v و q_A .

الجدول 3.4: التحميل الحجمي q_v والتحميل السطحي q_A عند حرق الفحم الحجري والبنّي والوقود السائل والغازي

q_A [MW/m ²]			q_v [MW/m ³]			الاستطاعة الحرارية [MW]
وقود سائل أو غازي	فحم بني	فحم حجري	وقود سائل أو غازي	فحم بني	فحم حجري	
4.4	3.0	3.3	0.34	0.20	0.22	200
5.6	3.5	4.1	0.31	0.17	0.19	400
3.9	4.1	5.2	0.28	0.14	0.16	800
8.4	4.6	6.3	0.24	0.10	0.13	1600

ويعسب الحجم اللازم لحجرة الاحتراق من المعادلة التالية:

$$V_F = Q_F / q_v \quad (19.4)$$



الشكل 8.4 : التحميل الحجمي

والسطحي لحجرة الاحتراق

وتحميل سطوح تسخين المبخّر

وعلاقتها باستطاعة البخار عند

استخدام أنواع الوقود المختلفة.

أما مقطع حجرة الاحتراق A_F فيحسب من Q_F و q_A والارتفاع H_F لحجرة الاحتراق كما يلي:

$$(20.4) \quad A_F = Q_F / q_A \text{ أو } H_F = V_F / A_F$$

يبين الشكل (8.4) التحميل السطحي والحجمي لحجرة الاحتراق وكذلك تحمل سطوح تسخين المبخر وذلك بالنسبة لأنواع الوقود المختلفة. يستخدم تحميل سطوح تسخين المبخر من أجل تحديد مواصفات المبخر.

1.4 مثال

يُعطى من أجل مولد بخار يحرق الفحم البني ما يلي:

$$1. \text{ الاستطاعة الكهربائية لوحدة التوليد } P_{el} = 730 \text{ MW}$$

$$2. \text{ مردود حجرة الاحتراق } \eta_F = 0.995$$

$$3. \text{ تدفق الوقود } m_F = 160 \text{ kg/s}$$

$$4. \text{ عامل فائض الهواء } \lambda = 1.3, \text{ درجة حرارة الهواء } t_A = 300^\circ \text{C}, \text{ السعة الحرارية النوعية للهواء}$$

$$c_{pA} = 1.3 \text{ kJ/m}^3 \text{K}$$

$$5. \text{ التحميل الحجمي والسطحي على التوالي هما: } q_V = 0.14 \text{ MW/m}^3 \text{ و } q_A = 4.1 \text{ MW/m}^2$$

ما هي أبعاد حجرة الاحتراق وما هي الاستطاعة الحرارية لها؟

الحل

$$1. \text{ تبلغ كمية الهواء الدنيا اللازمة لاحتراق الفحم البني الخام } A_{min} = 3.1 \text{ m}^3/\text{kg} \text{ والقيمة الحرارية}$$

$$\text{الدنيا له } LCV = 9.63 \text{ MJ/kg}$$

$$2. \text{ كمية الحرارة المحمولة إلى حجرة الاحتراق مع كل من الوقود وهواء الاحتراق:}$$

$$Q_F = m_F (LCV + \lambda A_{min} c_{pA} t_A)$$

$$= 160 \text{ kg/s} (9.63 \text{ MJ/kg} + 1.3 \times 3.1 \text{ m}^3/\text{kg} \times 1.3 \text{ kJ/m}^3 \text{K} \times 300^\circ \text{C})$$

$$= 2530 \text{ MW}$$

$$3. \text{ حجم ومقطع وارتفاع حجرة الاحتراق تُحسب كما يلي:}$$

$$V_F = Q_F / q_V = 2530 \text{ MW} / 0.14 \text{ MW/m}^3 = 18072 \text{ m}^3$$

$$A_F = Q_F / q_A = 2530 \text{ MW} / 4.1 \text{ MW/m}^2 = 617 \text{ m}^2$$

$$H_F = V_F / A_F = 18072 \text{ m}^3 / 617 \text{ m}^2 = 29.3 \text{ m}$$

4. الاستطاعة الحرارية للفيدة تنتج الآن كما يلي:

$$Q_u = Q_F \times \eta_F = 2530 \times 0.995 = 25174 \text{ MW}$$

4.4 مولدات البخار ذات فرشاة الوقود ذات الحركة الدوامية

1.4.4 أنواع فرشات الوقود ذات الحركة الدوامية

تستخدم طريقة الطبقة التي تحصل فيها حركة شديدة (فرشة الوقود الدوامية) لحرق الوقود في مولدات البخار منذ عشر إلى خمس عشرة سنة، فهي تمثل تقانة ملائمة للبيئة عند إحراق الأنواع الصلبة من الوقود (الفحم البني والحجري والفضلات). يحدث الاحتراق بهذه الطريقة في مجال لدرجات الحرارة يتراوح بين 850 و 950 °C وبانبعاث قليل لأكاسيد الكبريت والآزوت (التتروجن).

فيما يلي سنبحث في هذه التقانة المبتكرة، ولهذا سنستعرض في البداية الجوانب المتعلقة بالجريان وانتقال الحرارة في فرشاة الوقود السائلة. تقسم جملة الحبيبات الصلبة والغاز التي تنشأ عن حركة الحبيبات الصلبة نتيجة جريان مائع غازي خلالها (مثل الهواء) الشكل (9.4) إلى:

— فرشاة ساكنة (كومة)،

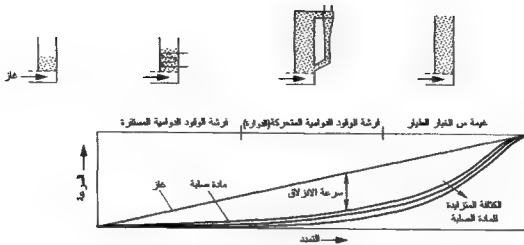
— فرشاة متحركة،

— دافع هوائي (تيار متطائر).

لنلاحظ كومة من الحبيبات الصلبة في جهاز أسطواني أو مكعب، يدخل الغاز من قعره بشكل موزع. تتحرك حبات الكومة بفعل الغاز الداخل من القعر وتزداد سرعتها باستمرار. عند سرعات منخفضة للغاز تحاط الحبيبات الصلبة للكومة بتيار الغاز، وعند سرعة جريان معينة تُدعى سرعة التميع (التخلخل) الصغرى w_{mf} يتم الانتقال من الفرشة الساكنة إلى الفرشة المتحركة. يستمر اختلاط الحبيبات الصلبة بالغاز وتحركها في الفرشة المتحركة بفعل تيار الغاز بشدة تتعلق بسرعة تيار الغاز، وعند ازدياد سرعة الغاز تكبر المسافة بين الحبيبات الصلبة ويزداد الحجم الإجمالي للفرشة المتحركة أيضاً.

هناك الأنواع التالية من فرشات الوقود ذات الحركة الدوامية:

— فرشاة الوقود الدوامية المستقرة والمعرضة للضغط الجوي



الشكل 10.4 : فرشاة الوقود ذات الحركة الدوامية المعرضة للضغط الجوي.

المسامية

يُفهم من مسامية فرشاة الوقود السائلة ε المسافة النسبية بين الحبيبات:

$$(21.4) \quad \varepsilon = 1 - V_p / V$$

حيث: V الحجم الكلي لفرشاة الوقود الدوامية [m^3]

V_p حجم الحبيبات الصلبة في الفرشاة الدوامية [m^3]

في وضعية تخلخل (تباعده) الحبيبات تكون المسامية مساوية لـ ε_{mf} . تكون قيمة المسامية لفرشاة الوقود الدوامية المستقرة أكبر من ε_{mf} (حوالي 0.4) عند سرعة التميع (تخلخل الحبيبات) الصغرى. عندما تكون $\varepsilon < \varepsilon_{mf}$ تبقى فرشاة الوقود مستقرة، وعندما تصبح $\varepsilon \approx 1$ يحدث انتقال للحبيبات عند الضغط الجوي. وفي فرشاة الوقود الدوامية المتحركة تكون سرعة الغاز w أكبر من سرعة حبيبات المادة الصلبة w_p ، ومع تزايد سرعة الغاز يزداد تمدد ومسامية فرشاة الوقود الدوامية ε . تكون سرعة ومسامية كل من الغاز والحبيبات الصلبة في فرشاة الوقود الدوامية المستقرة أقل من مثيلاتها في فرشاة الوقود الدوامية المتحركة.

قطر الحبيبات الصلبة

يتحدد الحجم الوسطي للحبيبة عن طريق القطر الوسطي لحبيبة كروية:

$$(22.4) \quad d_p = (6 m_p / \pi \rho_p)^{1/3} \quad [m]$$

حيث: d_p قطر الحبيبة [m]

m_p كتلة عينة من الحبيبات [kg]

n عدد الحبيبات في العينة

π قيمة pi تبلغ (... 3.14)

ρ_p الكتلة النوعية للجسم الصلب [kg / m³].

الأرقام المميزة: سرعة السيلان الصغرى، ضياع الضغط

عند حساب الجريانات في فرشاة الوقود الدوامية تستخدم الأرقام اللابعدية المميزة التالية:

□ رقم رينولدز

$$(23.4) \quad Re = w d_p / \nu$$

□ رقم أرخميدس

$$(24.4) \quad Ar = g d_p^3 (\rho_p - \rho) / \rho \nu^2$$

□ رقم فرود

$$(25.4) \quad Fr = w / \sqrt{(g d_p)}$$

حيث: w سرعة الغاز [m / s]

d_p قطر الحبيبات المكافئ [m]

ν اللزوجة الحركية للغاز [m²/s]

g التسارع الأرضي (9.81 m/s²)

ρ و ρ_p الكتلة النوعية للحبيبة وللغاز على التوالي

سرعة التميع الصغرى w_{mf} تحسب بالعلاقة التالية:

$$(26.4) \quad Re_{mf} = \sqrt{(27.2^2 + 0.0408 Ar)} - 27.2$$

$$(27.4) \quad w_{mf} = Re_{mf} \nu / d_p \quad [m / s]$$

وهكذا تكون قوة الجريان المؤثرة على حبيبة مساوية تقريباً لوزن الحبيبة.

أما هبوط الضغط في فرشاة الوقود الدوامية المستقرة فيحسب كما يلي:

(28.4)

$$\Delta p = \rho w^2 (H / d_p) (21 + 1750 / Re) \text{ [Pa]}$$

أو:

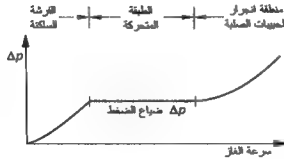
$$\Delta p = g (\rho_p - \rho) H (1 - \varepsilon)$$

(29.4)

$$= g (\rho_p - \rho) H_{mf} (1 - \varepsilon_{mf}) \text{ [Pa]}$$

حيث: H أو H_{mf} ارتفاع فرشاة الوقود الدوامية عند مسامية ε وفي حالة تخلخل (تباعدا) الحبيبات تؤخذ للمسامية ε_{mf} .

يبين الشكل (11.4) العلاقة بين هبوط الضغط Δp وسرعة الغاز w لفرشاة الوقود الدوامية المستقرة. ومن السهل مشاهدة أن ضياع الضغط في الكومة السفلية الساكنة يزداد مع مربع السرعة w^2 ولكنه يبقى ثابتاً في الطبقة (الفرشاة) المتحركة.



الشكل 11.4 : ضياع الضغط Δp في الفرشاة الساكنة وفي فرشاة الوقود الدوامية المستقرة المعرضة للضغط الجري.

سرعة انجراف الحبيبات ومغادرتها للحيز الموجودة فيه

هي سرعة الغاز التي تُحمل فيها الحبيبات من فرشاة الوقود الدوامية وهي تحسب من المعادلة:

$$\begin{aligned} w_a &= Re_a v / d_p \\ &= 1.74 Ar v / d_p (31.3 + \sqrt{Ar}) \text{ [m/s]} \end{aligned} \quad (30.4)$$

مثال 2.4

ما هي سرعة التميع الصغرى لحبيبات الفحم التي قطرها الوسطي 1 mm وكتلتها النوعية 1450 kg/m³ عند درجة الحرارة 850 °C والضغط 1 bar؟

ما هو ضياع الضغط لفرشاة الوقود الدوامية المستقرة التي ارتفاعها 1.5 m، إذا كانت مسامية الطبقة عند سرعة التميع الصغرى 0.42؟

مواصفات الهواء عند 850 °C و 1 bar هي:

$$\rho = 1.293 \times 273 / (273 + 850) = 0.314 \text{ kg / m}^3$$

$$v = 142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

الحل

1. رقم أرخيدس

$$\begin{aligned} Ar &= g d_p^2 (\rho_p - \rho) / \rho v^2 \\ &= 9.81 \text{ m / s}^2 (1.10^{-3})^3 \text{ m}^3 \times (1450 - 0.314) \text{ kg / m}^3 / 0.314 \text{ kg / m}^3 \\ (142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s})^2 &= 2225.7 \end{aligned}$$

2. رقم رينولدز

$$\begin{aligned} Re_{mf} &= \sqrt{(27.2^2 + 0.0408 Ar)} - 27.2 \\ &= \sqrt{(27.2^2 + 0.0408 \cdot 2225.7)} - 27.2 = 1.62 \end{aligned}$$

3. سرعة التميعب الصغرى

$$\begin{aligned} w_{mf} &= Re_{mf} v / d_p \\ &= 1.62 \times 142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} / 1 \times 10^{-3} \text{ m} = 0.23 \text{ m / s} \end{aligned}$$

4. ضباغ الضغط لفرشة الوقود التي ارتفاعها 1.5 m ومساميتها 0.42 ϵ_{mf} يبلغ

$$\begin{aligned} \Delta p &= g (\rho_p - \rho) H_{mf} (1 - \epsilon_{mf}) \\ &= 9.81 \text{ m/s}^2 (1450 - 0.314) \text{ kg / m}^3 1.5 \text{ m} (1 - 0.42) = 12372.6 \text{ Pa} \end{aligned}$$

مثال 3.4

ما هي سرعة انجرار حبيبات الفحم التي قطرها الوسطي 1 mm وكتلتها النوعية 1450 kg/m³ عند درجة الحرارة 850 °C والضغط 1 bar، مواصفات الهواء عند هذا الضغط وهذه الحرارة هي: الكتلة النوعية 0.314 kg / m³ ρ اللزوجة الحركية 142.65 $\times 10^{-6}$ m²/s v رقم أرخيدس $Ar = 2225.7$.

الحل

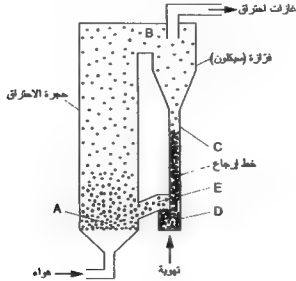
بتطبيق المعادلة (30.4) نجد سرعة انجرار حبيبات الفحم:

$$w_g = 1.74 \times 2225.7 \times 142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} / 1 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$(31.3 + \sqrt{2225.7}) = 7.04 \text{ m/s}$$

فقاعات الغاز

تتميز فرشاة الوقود الدوامية بتشكيل فقاعات الغاز وهي عادة ذات تركيب غير متجانس. يحدث تميع المادة الصلبة عن طريق جزء فقط من تيار الغاز الإجمالي، أما الجزء الآخر من تيار الغاز فإنه يمر على شكل فقاعات غاز عبر الطبقة الدوامية، وعملية تكون فقاعات الغاز حرة وخالية من الحبيبات الصلبة، وهي تُساعد على اختلاط الحبيبات. يحدث عند شروط معينة جريان أسطواني للفقاعات يقلل من التبادل الحراري بين فرشاة الوقود السائلة وسطوح التسخين.



الشكل 12.4 : مخطط فرشاة الوقود الدوامية الدوارة.

فرشاة الوقود الدوامية الدوارة

يكون حجم الحبيبات الصلبة في هذه الفرشاة أصغر منه في الفرشاة المستقرة، وتكون سرعة الغاز أكبر من سرعة انجرار الحبيبات الصلبة (الشكل 12.4). هنا تُحمل الحبيبات من فرشاة الوقود وتنقل إلى فرازة (سيكلون) حيث تفصل هناك عن تيار الغاز ويعاد إرسالها إلى فرشاة الوقود. إن توزيع الحبيبات الصلبة على طول الارتفاع في فرشاة الوقود الدوامية الدوارة غير متجانس، ويمكن التمييز بين منطقتين، إحداهما تكون كثافة المادة الصلبة فيها عالية ويكون ارتفاعها عدة أمتار فوق الأرضية

المثقبة، والمنطقة الأخرى بارتفاع عدة أمتار أخرى فوق المنطقة الأولى تكون حولتها من الحبيبات الصلبة قليلة.

يستخدم في فرشاة الوقود الدوامية الدوارة فحم يتراوح حجم حبيباته بين 0.1 و 6 mm، أما سرعة هواء التميع (التخلخل) الذي يرسل في الأرضية المثقبة عبر طبقة الوقود فتتراوح بين 3 و 8 m/s وبعكس فرشاة الوقود الدوامية الساكنة فإن فرشاة الوقود الدوامية الدوارة تمثل حجم حجرة الاحتراق كله.

وتسود في فرشاة الوقود الدوامية الدوارة لرقمي أرخميدس وفروود القيم التالية:

$$0.01 < Ar < 100$$

$$0.01 (\rho_p / \rho - 1) < Fr < 100 (\rho_p / \rho - 1) \quad \text{و}$$

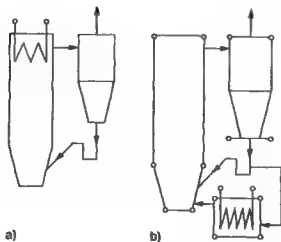
يمكن حساب سرعة النقل وفق العلاقة التحريمية التالية (من أجل $Ar < 5.10^4$):

$$w_w = 1.45 (v / d_p) Ar^{0.484} \quad (31.4)$$

حيث: v اللزوجة الحركية لمادة التميع $[m^2/s]$

d_p القطر الوسطي للحبيبة

Ar رقم أرخميدس.



الشكل 13.4 : إعادة الحبيبات الصلبة من الفرازة (السيكلون) إلى فرشاة الوقود الدوامية الدوارة عن طريق وعاء غاطس (a) أو عن طريق ممر ذي فرشاة نقالة (b).

مثال 4.4

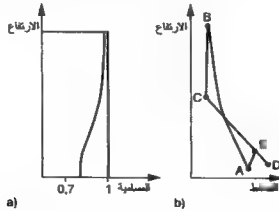
ما هي سرعة نقل حبيبات الفحم التي قطرها الوسطي 1 وكتلتها النوعية 1450 kg/m^3 عند درجة الحرارة 850°C والضغط 1 bar .
مواصفات الهواء عند درجة الحرارة 850°C والضغط 1 bar هي: $\rho = 0.314 \text{ kg/m}^3$ ، $Ar = 2225.7$ ، $v = 142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

الحل

$$\begin{aligned} w_{tr} &= 1.45 (v / d_p) Ar^{0.484} \\ &= 1.45 (142.65 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} / 1 \times 10^{-3} \text{ m}) 2225.7^{0.484} \\ &= 8.63 \text{ m/s} \end{aligned}$$

تُفصل حبيبات الفحم التي لم تحترق بشكل كامل مع حبيبات الرماد في فرازة تالية وتعاد إلى فرشاة الوقود الدوامية عن طريق وعاء غاطس أو عن طريق مبرد ذي فرشاة نقالة والشكل (13.4) يوضح ذلك بشكل تخطيطي.

يتناقص حجم الحبيبات وكثافة تواجدها في فرشاة الوقود الدوامية الدوارة بالابتعاد عن الأرضية المنقبة، ولكن مسامية الفرشة تزداد من 0.7 في الأسفل إلى 1 في الأعلى الشكل (14.4a).



الشكل 14.4 : تغير المسامية (a) والضغط (b) تبعاً للارتفاع في فرشاة وقود دوامية دوارة.

ضياح الضغط

من أجل دورة للوقود الصلب في حجرة الاحتراق AB (ضياح ضغطها Δp_{FR}) وفي المنطقة الانتقالية (التي ضياح ضغطها Δp_{tr})، وفي الفرازة BC (التي ضياح ضغطها Δp_c) وعند حط

الإرجاع CED (الذي ضياع ضغطه Δp_R) وكما هو موضح في الشكل (b14.4) يمكن كتابة معادلة موازنة الضغط التالية:

$$(32.4) \quad \Delta p_R = \Delta p_{FR} + \Delta p_w + \Delta p_o \quad [\text{Pa}]$$

تحدد Δp_R و Δp_w بناءً على وزن الجسم الصلب في الموقع المدروس من الدورة وبمراعاة تغير المسامية ε لفرشة الوقود ولاارتفاعها H ويإهمال وزن الغاز، وذلك من العلاقة التالية:

$$(33.4) \quad \Delta p = g \int (1 - \varepsilon) \rho_p dH \quad [\text{Pa}]$$

وضياع الضغط للفرازة:

$$(34.4) \quad \Delta p_z = \zeta \rho w_{c,ent}^2 / 2 \quad [\text{Pa}]$$

حيث: ζ عامل المقاومة للفرازة

ρ الكتلة النوعية للغاز $[\text{kg/m}^3]$

$w_{c,ent}$ سرعة الغاز عند مدخل الفرازة $[\text{m/s}]$.

عند إقلاع (بدء تشغيل) مولد البخار تتألف الفرشة الدوامية من المادة الداخلية فقط (رمل كوارتزي أو رماد). بسبب العطالة الحرارية العالية للفرشة الدوامية فإن زمن الإقلاع عند التشغيل من الحالة الباردة أكثر من زمن إقلاع مولدات البخار التقليدية، ولكنه عند التشغيل من الحالة الساخنة يكون أصغر من المولدات التقليدية.

2.4.4 تخفيض انبعاثات الغازات الضارة في فرشة الوقود الدوامية

يمكن التمييز بين:

- الحرق في فرشة الوقود الدوامية المستقرة عند الضغط الجوي.
- الحرق في فرشة الوقود الدوامية الدوارة.
- الحرق في فرشة الوقود الدوامية ذات الضغط العالي.
- ومزايا الحرق في فرشة الوقود الدوامية هي:
- سحب الكبريت في حجرة الاحتراق.
- الانبعاث القليل لأكاسيد الآزوت (النروجين) بسبب درجات الحرارة المنخفضة السائدة (850 حتى 900 °C).

يوجد في غرف الاحتراق لمولدات البخار ذات الفرشة الدوامية مزيج من المواد الصلبة يتكون من جزيئات من الفحم (الكربون) والرماد والكلس.

تتراوح درجة الحرارة في فرشة الوقود الدوامية بين 800 و900°C، ويمكن تحقيق ذلك عن طريق تركيب سطوح تسخين مثل الميخرات أو عن طريق اختيار قيمة مناسبة لعامل فائض الهواء. يمكن سحب أكاسيد الكبريت بسهولة عند استخدام فرشة الوقود السائلة. وإذا استخدم الحجر الكلسي مع الفحم فإن الكلس يتحد مع ثاني أكسيد الكبريت الذي ينشأ مع غازات الاحتراق ويتشكل الجص (الجبصين، الجبس) الذي يطرح مع الرماد. وتعد النسبة Ca/S عامل تأثير هام إلى جانب درجة الحرارة. وتبلغ هذه النسبة في فرشة الوقود الدوامية الدوارة 1.5 — 2.5 وفي فرشة الوقود الدوامية المستقرة تكون محدود 3 أو أعلى. يكون انبعاث SO_2 في فرشة الوقود السائلة المستقرة 100 ppm (حوالي 290 mg/m³ عند الشروط النظامية).

يتأمن في الفرشة الدوامية الوقت الكافي لهذه التفاعلات عند درجة حرارة مثلى للتفاعل. يتناقص تشكل NO من هواء الاحتراق بشكل كبير في فرشة الوقود الدوامية، وذلك بسبب انخفاض درجة حرارة الاحتراق، وينشأ NO_x في غازات احتراق فرشة الوقود الدوامية بشكل رئيسي بسبب تأكسد الآزوت (التروجين) الموجود في الوقود. يتم تقسيم هواء الاحتراق إلى هواء أولي وثانوي. يقوم الهواء الأولي بتجميع (خلخله) الحبيبات الصلبة ويرسل بكميات تكفي لهذا الغرض عبر الأرضية المثقبة لفرشة الوقود الدوامية، ويقوم بالإضافة إلى ذلك بدوره في الاحتراق. أما الهواء الثانوي فيُساق إلى حجرة الاحتراق فوق فرشة الوقود الدوامية بقصد إتمام الاحتراق، ويمكن عن طريق الإحراق في مرحلتين تخفيض تركيز NO_x في غازات الاحتراق من 50 إلى 100 ppm أو 100 إلى 200 mg/m³ (NO_2) في الشروط النظامية، عند مخرج المرحلة). وتبلغ في فرشة الوقود الدوامية المستقرة 150 إلى 250 ppm أو 300 إلى 500 mg/m³ (NO_2) في الشروط النظامية، عند مخرج المرحلة).

أما مركبات HCl و HF التي مصدرها الوقود فإنها تتشكل عند درجات الحرارة التي تسود عادة في فرشة الوقود الدوامية بمعدل 50 إلى 80 % بالنسبة للكحول و 90 إلى 99 % بالنسبة للفلور. أما سرعة الغاز فتكون في فرشة الوقود الدوامية المستقرة متوسطة بين المعسبات وبين حراقات الفحم المسحوق ذات السرعة العالية للغاز في حجرة الاحتراق. وتقع درجة الحرارة في العادة عند 850 °C ومع اختلاف $\pm 50^\circ C$.

تتراوح قيمة التحميل السطحي في فرشاة الوقود السائلة المستقرة بين 1 و 3 MW/m². عند اكتمال احتراق الأجزاء القابلة للاحتراق في الفحم فإن حبيبات الحم الصغيرة جداً تحمل مع غازات الاحتراق وتغادر فرشاة الوقود الدوامية، أما بقايا الاحتراق فإنها تسقط عبر ثقب الأرضية ليتم سحبها. وتحمل غازات الاحتراق جسيمات الرماد بحدود 80 g/m³. أما طرح الحرارة من حجرة الاحتراق ذات فرشاة الوقود الدوامية المستقرة فيجري بمساعدة سطوح تسخين غاطسة، وهذا مرتبط بالمشاكل التالية:

— تأكل (حت) سطوح التسخين الغاطسة.

— عدم اكتمال الاحتراق.

— ازدياد انبعاث الغازات الضارة عند الحملات الجزئية.

تستخدم حالياً فرشاة الوقود الدوامية المستقرة لحرق أنواع الوقود ذات القيم الحرارية المنخفضة (فحم بني ذو محتوى عالٍ من الرماد والرطوبة أو لحرق النفايات).

تتألف فرشاة الوقود الدوامية الدوارة من حجرة احتراق وفرازة ويجرى لإرجاع الحبيبات الصلبة، وتحمل هذه الحبيبات عادة مع تيار الغاز فتغادر فرشاة الوقود الدوامية وتصل إلى الفرازة التي تفصلها عن غازات الاحتراق، ويُعاد الرماد مع الفحم إلى حجرة الاحتراق.

ومن أنواع فرشات الوقود الدوامية التي يتم إنتاجها هناك Ahlström، Circofluid، Ecoflow، وLurgi.

ولتمييزها عن بعضها فهناك الحراقات التالية:

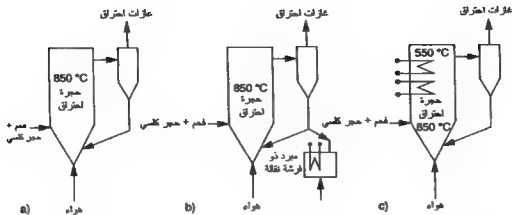
— حراقات فرشاة الوقود الدوامية الدوارة مع وعاء غاطس وإحكام هيدروليكي،

— حراقات فرشاة الوقود الدوامية الدوارة مع مورد ذي فرشاة نقالة،

— حراقات Circofluid (ذات المائع الدوار).

والشكل (15.4) يبين أنواع مولدات البخار بشكل تخطيطي.

وفي الحراقات من النوع الأول يحدث انتقال الحرارة بشكل رئيسي عند جدار حجرة الاحتراق التي تُصنع من أنابيب ملحومة أي كجدار غشائي (membrane). يمكن في الجزء العلوي من حجرة الاحتراق إضافة سطوح تسخين، وهي عبارة عن أنابيب موضوعة بشكل أفقي إلى جانب بعضها البعض وتعرها بشكل متعامد غازات الاحتراق. يتراوح التحميل الحراري السطحي لحجرة احتراق فرشاة الوقود الدوامية الدوارة بين 3 - 8 MW/m².

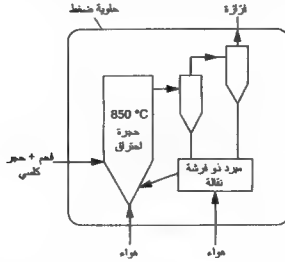


الشكل 15.4 : مولدات البخار ذات فرشاة الوقود الدوامية الدوارة (a) فرشاة عادية (b) فرشاة مع مبرد ذو فرشاة نقالة (c) مائع دوّار.

وحتى عام 1994 بنيت في العالم 146 منشأة من النوع الأول وبمجموع استطاعتها الحرارية P_{th} حوالي 15 GW، أنتجت شركة Ahlström Pyropower السويدية 92 منها باستطاعة حرارية P_{th} قدرها 9.9 GW وأنتجت شركة KDO Tampella الفنلندية 18 منشأة باستطاعة حرارية P_{th} قدرها 2.6 GW وشركة Lurgi الألمانية أنتجت 9 منشآت باستطاعة حرارية P_{th} تبلغ 0.9 GW... إلخ. وفي اليابان تعمل منذ عام 1994 أكبر منشأة في العالم Takehara ذات فرشاة وقود دوامية مستقرة باستطاعة كهربائية 350 MW، وفي عام 1995 وضعت في الخدمة أول منشأة لفرشاة وقود دوامية دوارة باستطاعة كهربائية 250 MW، وسيتم التحول إلى وحدات كبيرة لفرشاة الوقود الدوامية الدوارة وباستطاعات 500 إلى 600 MW. توجد في العالم حتى الآن أربع منشآت تعمل بفرشاة وقود دوامية مضغوطة، وتجرب الآن في اليابان منشأة من هذا النوع باستطاعة كهربائية قدرها 71 MW (في واكاماتسو Wakamatsu).

لتسهيل امتصاص الحرارة المفيدة من فرشاة الوقود الدوامية الدوارة يستخدم مبرد ذو فرشاة نقالة، يركب تحت الفرازة. ويسحب من هذا المبرد حوالي 40 % من استطاعة التبخير الإجمالية، وقد رُكب حتى الآن 43 فرشاة وقود دوامية دوارة مع مبرد ذي فرشاة نقالة ويبلغ مجموع استطاعتها 7.7 GW. شركة Lurgi بنت 3 منشآت $P_{th} = 800$ MW وشركة Steinmüller بنت منشأتين $P_{th} = 250$ MW. أما شركة Babcock فقد طورت وبنت 21 منشأة من النوع Circocfluid وباستطاعة حرارية إجمالية قدرها 1.8 GW.

يتحسن احتراق الفحم ويصبح من الأسهل امتصاص أوكسيد الكبريت عن طريق الحجر الكلسي، وكذلك يقل نشوء أكاسيد الآزوت في حجرة الاحتراق وذلك كلما ارتفع الضغط في حجرة الاحتراق. فبذلك يمكن تصغير حجم حجرة الاحتراق وربما مساحة سطوح التسخين. ولإيصال الفحم إلى فرشاة الوقود الدوامية المضغوطة وللتخلص من الحُث تستخدم مجارٍ خاصة معقدة. الشكل (16.4) يوضح تخطيطاً حرقات فرشاة الوقود الدوامية الدوارة.



الشكل 16.4 : مخطط عمل فرشاة الوقود السائلة الدوارة ذات الضغط العالي والمبرّد ذي الفرشة النقالة.

على العكس من فرشاة الوقود الدوامية التي تعمل عند الضغط الجوي فإن فرشاة الوقود الدوامية المضغوطة يمكنها أن تعمل في منشآت البارة المركبة (العنفات الغازية والبخارية) تتضمن المنشأة عندئذ فرشاة وقود دوامية مضغوطة، وساحب الغبار من الغاز الساخن وعنفة غازية ومرجل امتصاص حرارة الغازات ومنشأة عنفة بخارية، وحجرة احتراق فرشاة الوقود الدوامية تعوض في هذه الحالة عن حجرة احتراق العنفة الغازية. يجري الغاز الذي يفوق ضغطه 10 bar ودرجة حرارته 900 °C حول ساحب الغبار من الغاز الساخن ثم يدخل على العنفة الغازية، وبعد تعده في العنفة الغازية يستخدم الغاز لتوليد البخار في المرحل للوصول بمنشأة البخار التالية. ولتحقيق مردود عالٍ يجب أن تكون درجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة الغازية 1100 °C، بينما تقع درجة الحرارة المثلى لارتباط الكبريت في فرشاة الوقود الدوامية في حدود 800 إلى 900 °C. ستتم معالجة منشآت الدارة المركبة في الفصل الثامن.

5.4 تصميم سطوح التسخين

1.5.4 الموازنة الحرارية لسطوح التسخين والاستطاعة الحرارية المنقولة

سنعرض في هذا الفصل التصميم الحراري لسطوح التسخين. إن تصميم مولد البخار شديد التعقيد، إذ أن ذلك يتضمن قبل كل شيء الحساب الحراري وحساب الجريانات لسطوح التسخين، والجزء التالي للتصميم هو حساب المقاومة للأجزاء المعرضة للضغط ولمساند الحمل وكذلك تحديد أجهزة القياس والتحكم. من أجل حسابات الجريان يمكن الاستعانة بالمبادئ التي عرضناها في الفصل الأول.

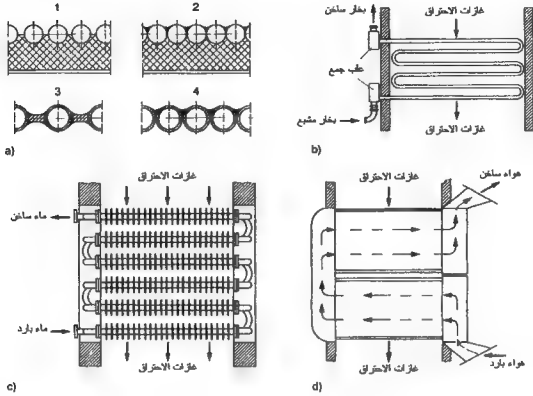
توضع الأسس اللازمة لهذه الحسابات استناداً إلى معطيات عن الاستطاعة ومواصفات البخار وماء التغذية (ضغط ودرجة حرارة ماء التغذية والبخار الطازج وكذلك شروط التخميص الوسطي)، وعن مواصفات الوقود وطريقة إحراقه إلخ.. وتوضع لكل جزء الموازنة الحرارية والكتلية.

تتألف سطوح تسخين مولد البخار من قسم تنتقل الحرارة إليه بالحمل وآخر بالإشعاع. الأجزاء التي تنتقل إليها الحرارة بالإشعاع هي للمبخرات والمحمصات الإشعاعية. يوضع المبخر على جذران حجرة الاحتراق، أما المحمص الإشعاعي فيعلق على الجزء العلوي لغرفة الاحتراق. أما الأجزاء التي تنتقل الحرارة إليها بالحمل فهي المحمصات التلامسية والمحمصات الوسطية والمسخنات الأولية للماء (Eco) ومسخنات الهواء. وتوضع عادة في المجرى الثاني للمرجل (الغلاية).

يقوم الحساب الحراري لمولد بخار على حسابات عمليات انتقال الحرارة (انظر الفصل الأول). ويُراعى في حجرة الاحتراق بالدرجة الأولى إشعاع الغاز والشعلة، ويمكن عملياً إهمال انتقال الحرارة بالحمل. يُشارك في سطوح الإشعاع إلى جانب الإشعاع الحمل أيضاً. يُراعى في سطوح الحمل عملية الحمل بالدرجة الأولى إلى جانب إشعاع غازات الاحتراق. إذا كانت درجة حرارة غازات الاحتراق أدنى من 400°C، فإن إشعاع الغازات يمكن إهماله.

فيما يلي سنعرض الأسس اللازمة للدراسة الحرارية لسطوح تسخين مولد البخار، وهدف هذه الحسابات هو تحديد مساحة سطوح التسخين اللازمة، وسنقدم كمثال دراسة عن مسخن أولي لماء التغذية (Eco) ومسخن هواء أولي متحدد.

يوضح الشكل (17.4) بشكل تخطيطي تفاصيل كل من المبخر والمحمص والمسخن الأولي لماء التغذية، ومسخن الهواء الأولي.



الشكل 17.4 : التصميم النمطية لسطوح التسخين (a) مبخر (1) جدار حجرة احتراق غشائي membrane (2) جدار ذو طبقة واحدة من الأنابيب (3) صفائح ملحومة (4) أنابيب ملحومة، (b) محمص، (c) مسخن ماء أولي، (d) مسخن هواء أولي أنبوبي.

الموازنة الحرارية لسطح التسخين

تكتب معادلة الموازنة الحرارية لسطح تسخين ما بالشكل التالي:

$$(35.4) \quad Q = m_G (h_{G,ent} - h_{G,exit}) = m_f (h_{f,exit} - h_{f,ent}) \quad [W]$$

حيث: Q التمدد الحراري (أي الاستطاعة الحرارية المتبادلة) $[W]$

m_G التمدد الكتلي لغازات الاحتراق $[kg/s]$

$h_{G,ent}$ و $h_{G,exit}$ الانتالي النوعي لغازات الاحتراق عند الدخول والخروج $[J/kg]$

m_f تدفق المائع الكتلي (الماء، البخار، الهواء) [kg/s]

$h_{f,exit}, h_{f,ent}$ الانتالي النوعي للمائع عند الدخول والخروج من سطح التسخين [J/kg].

يمكن التعويض عن انتالي غازات الاحتراق وانتالي المائع (ماء، بخار، هواء) بجداء درجة الحرارة t [°C] والسعة الحرارية النوعية c_p [J/kg K]، لكن المبخر يشكل استثناءً لأنه يحدث فيه تغير في الطور (الحالة) أي من الماء إلى البخار مع بقاء درجة حرارة الإشباع ثابتة.

الاستطاعة الحرارية المنقلة

تتألف عملية نفوذ الحرارة من غازات الاحتراق إلى المائع الوسيط الذي يوجد في داخل سطوح التسخين من انتقال للحرارة من غازات الاحتراق إلى السطح الخارجي للسطوح ومن التوصيل في الجدار وبعدها انتقال الحرارة من الجدار الداخلي لسطح التسخين إلى الوسيط الذي يجري داخل سطح التسخين. تُحسب الاستطاعة الحرارية المنقلة وفق ما يلي:

1. من أجل عملية انتقال الحرارة من غازات الاحتراق إلى سطح التسخين

$$Q = \alpha_{out} A_{out} (t_G - t_{w,out}) \quad [W] \quad (36.4)$$

2. وللتوصيل الحرارية في الجدار:

$$Q = (\lambda / \delta) A_m (t_{w,out} - t_w) \quad [W] \quad (37.4)$$

3. ولانتقال الحرارة من سطح التسخين إلى المائع الذي يجري في الداخل:

$$Q = \alpha_i A_{in} (t_{wi} - t_f) \quad [W] \quad (38.4)$$

حيث: α_{out} ، α_i عامل انتقال الحرارة عند السطح الخارجي أو الداخلي لسطح التسخين

[W/m² K]

A_m ، A_{in} ، A_{out} السطح الخارجي، الوسيط، الداخلي على التسلسل [m²]

λ عامل التوصيل الحراري لمادة سطح التسخين [W/m K]

δ سماكة الجدار [m]

t_f ، t_G درجة حرارة غازات الاحتراق أو المائع داخل سطح التسخين [°C]

t_{wi} ، $t_{w,out}$ درجة حرارة السطح الخارجي أو الداخلي [°C].

يمكن حساب درجات حرارة السطح الخارجية والداخلية ودرجة الحرارة الوسطية للجدار كما

يلي:

$$t_{wi} = t_f + Q / A \alpha_i, \quad T_{w,out} = t_G - Q / A \alpha_{out}$$

(39.4)

$$t_w = (t_{w,out} + t_{wi}) / 2$$

و

2.5.4 إشعاع الغاز والشعلة في حجرة الاحتراق

لتصميم مولد البخار فإن التبادل الحراري بالإشعاع ذو أهمية كبيرة، ونميز هنا بين إشعاع الغاز وإشعاع الشعلة. يحسب التيار الحراري المنقول بالإشعاع من غازات الاحتراق إلى الجدار المحيط أو الجدار الفثنائي للمبخر في حجرة الاحتراق كما يلي:

$$(40.4) \quad Q_{rad} = A_w C_o \epsilon_w [\epsilon_G (T_G / 100)^4 - \alpha_G (T_w / 100)^4]$$

حيث: A_w سطح التسخين أو الجدار $[m^2]$

C_o 5.67 $W/m^2 K^4$ عامل الإشعاع الحراري للجسم الأسود

T_w, T_G درجة حرارة الغاز الوسطية أو درجة حرارة الجدار الوسطية $[K]$

ϵ_w عامل إصدار سطح التسخين

ϵ_G عامل إصدار غازات الاحتراق عند درجة الحرارة T_G (emission)

α_G عامل امتصاص غازات الاحتراق عند درجة حرارة الجدار T_w .

بحسب عامل امتصاص غازات الاحتراق α_G عند درجة الحرارة T_w .

تستخدم المعادلة (40.4) أيضاً من أجل سطوح التسخين الأخرى في مولد البخار.

ولحساب ϵ_w يمكن اعتماد القيم التالية 0.7 - 0.96 للمعادن المؤكسدة، 0.7 - 0.93 لمواد البناء،

و 0.76 - 0.89 لرواسب الحث على سطوح التسخين.

من بين مركبات غازات الاحتراق يشارك فقط CO_2 . وبخار الماء H_2O في الإشعاع الغازي.

وتتعلق درجة الإصدار بدرجة الحرارة، وتتألف من الإصدار الحراري لكل من H_2O و CO_2 :

$$(41.4) \quad \epsilon_G = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O}$$

ولحساب درجة إصدار CO_2 و H_2O يمكننا أن نكتب:

$$\epsilon_{CO_2} = 1 \exp(-s k_{CO_2} p_{CO_2})$$

(42.4)

$$\epsilon_{H_2O} = 1 \exp(-s k_{H_2O} p_{H_2O})$$

و

حيث: s المسافة الوسطية (سماعة طبقة الغاز) في الحيز المملوء بغازات الاحتراق $[m]$

k_{CO_2} أو k_{H_2O} عامل الإخماد (الانطفاء) لـ CO_2 و H_2O $[1/m Pa]$

$p_{\text{H}_2\text{O}}$ أو p_{CO_2} الضغط الجزئي لـ H_2O و CO_2 [Pa].

بحسب الضغطان الجزئيان لـ H_2O و CO_2 بالاستعانة بالحجوم الجزئية $r_{\text{H}_2\text{O}}$ و r_{CO_2} والضغط الكلي p كما يلي:

$$(43.4) \quad p_{\text{H}_2\text{O}} = p r_{\text{H}_2\text{O}} \text{ [Pa]} \quad \text{و} \quad p_{\text{CO}_2} = p r_{\text{CO}_2} \text{ [Pa]}$$

أما مسار الإشعاع أي سماكة الطبقة الغازية (مثلاً حمرة الاحتراق) s فتحسب كما يلي:

$$(44.4) \quad s = 3.6 V / A_{\text{g}} \text{ [m]}$$

حيث: V حجم الحجرة المملوءة بالغاز (مثلاً حمرة الاحتراق) [m^3]

A_{g} مساحة السطح الجانبي للحيز [m^2].

مراقبة إشعاع اللهب يمكن التمييز بين شعلة مضئية وشعلة غير مضئية. يحترق الغاز الطبيعي بشعلة غير مضئية، بينما يحترق الوقود السائل والفحم بشعلة مضئية. وسبب إضاءة الشعلة هو بشكل أساسي حبيبات الهباب التي تشكل باحتراق الفحم والهيدروجينية الثقيلة للوقود السائل والأجزاء الطيارة من الفحم. ويبلغ قطرها الوسطي حوالي 0.03 mm. وتنشأ عند إحراق مسحوق الفحم حبيبات معلقة (معلقات) من الكربون وفحم الكوك والرماد في الغازات ضمن حجرة الاحتراق، وهذه حجمها أكبر بكثير من حبيبات الهباب.

إن درجة الإصدار (emission) للشعلة المضئية أعلى بكثير منها للشعلة غير المضئية. وتتميز الشعلة المضئية بالإشعاع المستمر للحبيبات، وهو يتعلق بالعوامل التالية: تحميل غازات الاحتراق بالحبيبات، وحجمها وكثافتها، ودرجة الحرارة والمسار الوسطي للإشعاع. تساهم الحبيبات بشكل خاص في مجال الأشعة تحت الحمراء بإصدار اللهب.

تُعطي المعادلة التقريبية التالية لحساب درجة إصدار الهباب:

$$(45.4) \quad \epsilon_{\text{soot}} = 1 - \exp(-s k_{\text{R}} c_{\text{R}})$$

حيث: k_{R} عامل الامتصاص لحبيبات الهباب [m^2/kg]

c_{soot} تحميل غازات الاحتراق بالهباب [kg/m^3].

تتراوح قيمة عامل الامتصاص k_{soot} لإشعاع الهباب بين 960 و 3400 m^2/kg . وكقيمة استرشادية لتركيز الهباب c_{soot} في شعلة الوقود السائل المضئية تؤخذ 750 mg/m^3 وفي شعلة الوقود الغازي غير المضئية تؤخذ 2.5 mg/m^3 .

تنتج درجة الإصدار (emission) ϵ_{ff} لشعلة مسحوق الفحم من العلاقة التالية:

$$(46.4) \quad \varepsilon_{FI} = 1 - (1 - \varepsilon_0)(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_{dk})(1 - \varepsilon_A)$$

حيث: $\varepsilon_A, \varepsilon_{dk}, \varepsilon_0, \varepsilon_1$ درجات الإصدار لغازات الاحتراق والكربون وفحم الكوك والرماد على التسلسل.

تُحسب درجة الإصدار للكربون وفحم الكوك، وحببيات الرماد بشكل مشابه لحببيات الهباب كما هو وارد في المعادلة (45.4).

وبطريقة تقريبية يُحسب تيار الإشعاع من الشعلة إلى الجدار أو إلى سطح تسخين المبخّر كما يلي:

$$(47.4) \quad Q_{Rad} = A_{FI} C_o \varepsilon_{eff} [(T_{FI} / 100)^4 - (T_w / 100)^4] \quad [W]$$

حيث: A_{FI} السطح المحيط بالشعلة $[m^2]$

ε_{eff} درجة لإصدار الفعلية لحجرة الاحتراق

T_w و T_{FI} درجة الحرارة الوسطية للشعلة والجدار.

تنتج قيمة ε_{eff} من درجات الإصدار ($\varepsilon_w, \varepsilon_{FI}$) والسطوح (A_w, A_{FI}) للشعلة و جدار حجرة الاحتراق:

$$(48.4) \quad \varepsilon_{FR} = 1 / [1 / \varepsilon_{FI} + (1 / \varepsilon_w - 1) A_{FI} / A_w]$$

يمكن حساب درجة الحرارة T_G فقط بطريقة التكرار (iterative) من الموازنة الحرارية لحجرة الاحتراق، أما درجة الحرارة الوسطية فيمكن حسابها وفق العلاقة التقريبية التالية:

$$(49.4) \quad T_{FI} = \sqrt{T_{th} T_{FR}} \quad [K]$$

حيث: T_{FR} و T_{th} درجة حرارة الاحتراق النظرية لغازات الاحتراق ودرجة حرارة غازات الاحتراق في نهاية حجرة الاحتراق. يبين الجدول (11.2) قيمةً استرشادية لكل من t_{th} و t_{FR} .

2. 5.4 انتقال الحرارة على سطوح التسخين الخارجية والداخلية

انتقال الحرارة الخارجي (من جهة غازات الاحتراق)

يحدث انتقال الحرارة من الغازات إلى سطوح التسخين الإشعاعية أو التلامسية لمولد البخار عن طريق الإشعاع والحمل، ويتألف التيار الحراري من الغازات إلى سطح التسخين (مبخّر، محمص، محمص وسطي، موقر، مسخن أولي للهواء) من جزء حلي وآخر إشعاعي. تطبق العلاقة التالية لحساب التيار الحراري الإجمالي من الغازات إلى سطح التسخين:

$$(50.4) \quad Q = Q_c + Q_{Rad} = (\alpha_c + \alpha_{Rad}) A (t_G - t_w) \text{ [W]}$$

حيث: α_c ، α_{Rad} عامل انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع وذلك من الغازات إلى سطح التسخين
[W/m² K]

A سطح التسخين [m²]

t_w ، t_G درجة حرارة الغازات والجدار [°C].

من أجل الأنابيب وحزم الأنابيب التي يعبرها الجريان بشكل عرضي يُحسب عامل انتقال الحرارة بالحمل α_c من جهة غازات الاحتراق كما يلي:

$$(51.4) \quad Nu = 1.11 C R_0^n Pr^{0.31}$$

وبحال الصلاحية هو: $Pr = 0.5 - 1000$.

يتعلق المقدار الثابت C والأس n عند الجريان حول حزمة حول أنابيب وعند رقم رينولدز الواقع في المجال بين 5×10^3 و 7×10^4 بالمقادير التالية: توضع الأنابيب (خلف بعضها كما في الشطرنج أو منسازحة وغير مرتبة خلف بعضها)، التقسيم النسبي العرضي والطولي للأنابيب (t_i/d ، t_p/d) الذي تتراوح قيمته بين 0.6 و 3. لذلك يجب تحديد مواصفات غازات الاحتراق عند درجة الحرارة الوسطية.

لحساب عامل انتقال الحرارة بالإشعاع.

$$(52.4) \quad \alpha_{Rad} = Q_{Rad} / A (t_G - t_w)$$

حيث: Q_{Rad} تحسب Q_{Rad} بحسب العلاقة (40.4).

انتقال الحرارة الداخلي (من جهة الوسيط المطلق للحرارة)

يحسب عامل انتقال الحرارة بالحمل α من السطح الداخلي للأنابيب إلى المائع الذي يجري في داخلها (أي الماء أو البخار أو الهواء) والتي تشكل سطوح تسخين مولد البخار وفق القوانين التي سنعرضها فيما يلي. من أجل الجريان الداخلي المضطرب (غير المنتظم) للمائع المألوف تستخدم العلاقة بين رقم نوسيل من جهة ورقم رينولدز ورقم برانتل من جهة أخرى (قارن الفصل الأول). يُحسب عامل انتقال الحرارة من أجل رقم نوسيل معطى كما يلي:

$$(53.4) \quad \alpha = \lambda Nu / d \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

حيث: λ عامل توصيل (ناقلية) المائع [W/m K]

d الطول المميز (القطر للأنابيب التي يجري المائع حولها أو على طولها [m].

بحسب عامل انتقال الحرارة لمختلف سطوح التسخين (مبخر، محمص، محمص وسطي، موفر، مسخن أولي للهواء) إما مباشرة أو بمساعدة معادلة رقم نوسيل.
ومن أجل المحمص أو المحمص الوسطي فإن عامل انتقال الحرارة من جهة البخار يحسب بمساعدة رقم نوسيل من المعادلة التالية:

$$(54.4) \quad Nu = 0.024 Re^{0.786} Pr^{0.45} [1 + (d/L)^{2/3}]$$

حيث: $Re = w d / \nu$ رقم رينولتز

Pr رقم برانتل

w سرعة جريان البخار [m/s]

d القطر الداخلي للأنبوب [m]

L طول الأنبوب [m]

ν اللزوجة الحركية للبخار [m²/s].

تعطى القيم المميزة للبخار (عامل التوصيل الحراري λ واللزوجة الحركية ν) ورقم برانتل المرتبط به عند درجة الحرارة المرجعية التالية:

$$t_m = 0.5 [t_w + 0.5 (t_{v,ent} + t_{v,exit})] \text{ [}^\circ\text{C]}$$

حيث: t_w درجة حرارة جدار الأنبوب [°C]

$t_{v,ent}$ و $t_{v,exit}$ درجة حرارة دخول البخار وخروجه [°C].

من أجل الجريان المضطرب للماء في الموفر (Eco) أي مسخن الماء الأولي وعندما يكون $Re > 2320$ و $Pr = 1.5 - 500$ يُحسب رقم نوسيل بالعلاقة التالية:

$$(55.4) \quad Nu = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} [1 + (d/L)^{-2/3}] (Pr / Pr_w)^{0.11}$$

حيث: Pr و Pr_w رقم برانتل للماء عند درجة حرارة وسطية t_f وعند درجة حرارة جدار الأنبوب t_w .

من أجل مسخن الهواء الأولي المتجدد وعند جريان مضطرب للهواء (عند $Re > 2320$ و $Pr = 0.5 \rightarrow 1.5$) تستخدم المعادلة التالية:

$$(56.4) \quad Nu = 0.0214 (Re^{0.8} - 100) Pr^{0.4} [1 + (d/L)^{2/3}] (t_m / t_w)^{0.45}$$

حيث: ϵ_m و ϵ_w درجة الحرارة الوسطية للهواء أو للحدار [°C].
تؤخذ القيم المميزة للمائع سواءً كان الماء أو الهواء (أي عامل التوصيل الحراري λ واللزوجة الحركية ν) ورقم برانتل الموافق من الجداول A.13 و A.14 في الملحق عند درجة حرارة وسطية للمائع.

4.5.4 انتقال الحرارة من فرشاة الوقود الدوامية إلى سطوح التسخين

في فرشاة الوقود السائل المستقرة التي تعمل عند الضغط الجوي تغطس سطوح التسخين في الفرشة - أما في فرشاة الوقود السائلة الدوارة وتجنّباً للتآكل بسبب السرعة العالية للغاز وبشكل خاص سرعات الحبيبات الصلبة، فإنه يستغنى في هذه الحالة عن سطوح التسخين الغاطسة في الفرشة. تصنع عادة سطوح التسخين للمبخر في حجرة الوقود السائلة الدوارة كحدران غشائية أو كحدران أنابيب مزعفة.

يُراعى في عامل انتقال الحرارة α_{FB} من فرشاة الوقود الدوامية إلى سطوح التسخين انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع. من أجل فرشاة الوقود الدوامية المستقرة التي تعمل عند الضغط الجوي، وحساب عامل انتقال الحرارة من الفرشة إلى الأنابيب الغاطسة يمكن استخدام العلاقة التجريبية التالية:

$$\alpha_{FB} = 900 (1 - \epsilon) (\lambda / d_s) [(w d_s \rho_p / 2\mu) (\mu^2 / g d_p^3 \rho_p^2)]^{0.326} \quad (57.4)$$

$$Pr^{0.3} + \epsilon_{FF} \sigma (T_{ws}^4 - T_w^4) / (T_{ws} - T_w) \quad [W / m^2 K]$$

حيث: ϵ مسامية فرشاة الوقود السائلة

λ عامل التوصيل (الناقلية) الحراري للغاز [W / mK]

w سرعة جريان الغاز عند المقطع الفارغ للجهاز [m/s]

d_s القطر الخارجي للأنبوب [m]

ρ_p الكتلة النوعية للحسيم (الحبيبة) [kg / m³]

μ اللزوجة الديناميكية للغاز [Pa . s]

g التسارع الأرضي [m² / s]

d_p قطر الحبيبة [m]

Pr رقم برانتل للغاز

ϵ_{FF} درجة الإصدار الفعلية للحملة المؤلفة من فرشاة الوقود السائلة وسطح التسخين

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 = \sigma$$

T_w و T_{FB} درجة حرارة فرشاة الوقود السائلة و سطح التسخين (جدار الأنبوب) [K].

تصلح هذه المعادلة عندما يكون: $(w d_p \rho / \mu) > 10$

ولحساب درجة الإصدار الفعلية بجملة [فرشاة الوقود السائلة و سطح التسخين] تطبق العلاقة التالية:

$$(58.4) \quad \epsilon_{eff} = 1 / (1 / \epsilon_{FB} + 1 / \epsilon_w - 1)$$

حيث: ϵ_{FB} و ϵ_w درجة الإصدار لفرشاة الوقود الدوامية و جدار الأنبوب.
ولحساب ϵ_{ws} :

$$(59.4) \quad \epsilon_{FB} = (\epsilon_p + 1) / 2$$

حيث: ϵ_p درجة إصدار الحبيبة (0.8 إلى 0.9)

يحدث انتقال الحرارة من فرشاة الوقود الدوامية النّوّارة إلى سطوح التسخين عن طريق الحمل والإشعاع، ويساهم في انتقال الحرارة الحبيبات المضطربة المتجمعة ككتل (قطاعات) والمواقع الفقيرة بالحبيبات الصلبة من فرشاة الوقود. عند كل لحظة يلامس جزء من سطح التسخين (α) قطاعاً من فرشاة الوقود فقيراً بالحبيبات الصلبة، والجزء الآخر يلامس القطاع الغني بكتل الحبيبات المتجمعة، وبالتالي يمكن تحديد عامل انتقال الحرارة من فرشاة الوقود الدوامية إلى سطح التسخين كما يلي:

$$(60.4) \quad \alpha_{FB} = \alpha (\alpha_c + \alpha_{Rad})_f + (1 - \alpha) (\alpha_c + \alpha_{Rad})_{ps} \quad [\text{W/m}^2\text{K}]$$

حيث: α و α_{Rad} عامل انتقال الحرارة عن طريق الحمل والإشعاع.

الدليل f يُشير إلى القطاعات الفقيرة بالوقود من فرشاة الوقود p_s إلى الحبيبات المتجمعة على شكل كتلة.

ومن أجل التوصيل من الحبيبات المتجمعة إلى سطح التسخين نطبق العلاقة:

$$(61.4) \quad \alpha_{ps} = 1 / (d_p / 10 \lambda + \sqrt{\pi t_{ps} / 4 \lambda c_{ps} \rho_{ps}})$$

حيث: d_p قطر الحبيبات [m]

λ عامل التوصيل الحراري للغاز [W/mK]

t_{ps} فترة بقاء الكتلة المتجمعة من الحبيبات الصلبة على سطح التسخين [s]

λ_{ps} عامل التوصيل الحراري الفعلي لكتلة الحبيبات المتجمعة [W/mK]

c_{ps} السعة الحرارية النوعية الفعلية لكتلة الحبيبات المتجمعة [J/kgK]

ρ_{ps} الكتلة النوعية الفعلية لكلية الحبيبات المتجمعة [kg/m³].

ومن أجل ρ_{ps} و c_{ps} يصلح:

$$\begin{aligned} c_{ps} &= (1 - \epsilon_{ps}) c_p + \epsilon_{ps} c_g \\ \rho_{ps} &= (1 - \epsilon_{ps}) \rho_p + \epsilon_{ps} \rho_g \end{aligned} \quad \text{أو}$$

حيث: ϵ_{ps} مسامية كتلة الحبيبات المتجمعة

c_p أو c_g السعة الحرارية النوعية للمحبيبات أو الغاز [J / kg K]

ρ_p أو ρ_g الكتلة النوعية لمحبيبات أو الغاز [kg / m³].

يمكن إهمال الحد الثاني في المعادلة 61.4 من أجل الحبيبات الخشنة ذات البقاء القصير على سطوح التسخين وتصبح المعادلة كما يلي:

$$(63.4) \quad \alpha_{cps} = 10 \lambda d_p$$

ومن أجل الجزء المرتبط بالحمل في عامل انتقال الحرارة من القطاع الفقير بالحبيبات الصلبة في فرشاة الوقود الدوامية إلى سطح التسخين تطبق المعادلة اللابعدية التالية:

$$(64.4) \quad Nu = (c_p / c_g) (\rho_g / \rho_p)^{0.3} Fr^{0.42} Pr$$

حيث: رقم نوسيل Nu d_p / λ

α_c عامل انتقال الحرارة بالحمل من فرشاة الوقود الدوامية إلى سطح التسخين [W/m²K]

d_p قطر الحبيبات [m]

λ عامل التوصيل الحراري للغاز [W/mK]

c_p أو c_g السعة الحرارية النوعية للحبيبات الصلبة أو الغاز [J/kg K]

ρ_p أو ρ_g الكتلة النوعية للحبيبات الصلبة في القطاع الفقير بالحبيبات من الفرشة أو

للحبيبات [kg/m³]

Fr رقم فرود (Froude) اللابعدى، يحسب عند سرعة الجريان للحبيبات w_g كما يلي:

$$Fr = w_g / \sqrt{(g d_p)}$$

Pr رقم براتل للغاز $\nu \rho_g c_g / \lambda$

ν اللزوجة الحركية للغاز [m²/s].

ومن أجل انتقال الحرارة بالحمل فقط تطبق المعادلة التالية:

(65.4)

$$Nu = 0.009 Pr^{1/3} Ar^{1/2} \quad [W / m^2 K]$$

حيث: رقم أرخليس $Ar = g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) / \rho_g v^2$

تعوض مواصفات الغاز $(\lambda, \rho, \nu, c_p)$ ورقم برانتل Pr في المعادلة 65.4 عند درجة حرارة فرشاة الوقود الدوامية.

تقع قيم α_{cp} بحسب المعادلة 61.4 عند الحدود العليا وبحسب المعادلة 64.4 أو 65.4 عند الحدود الدنيا للمجال الممكن. ويلعب الإشعاع في فرشاة الوقود الدوامية عند درجات الحرارة 800 إلى 900 °C دوراً مهماً. وبالتبسيط ينتج عامل انتقال الحرارة بالإشعاع كما يلي:

(66.4)

$$\alpha_{Rad} = 4 \varepsilon_{eff} \sigma T_m^3$$

حيث: عامل انتقال الحرارة بالإشعاع

ε_{eff} درجة الإصدار الفعلية (عملياً لا تؤخذ إلا 0.9)

σ ثابت بولتزمان وقيمته $5.67 \cdot 10^{-8} W / m^2 K^4$

T_m درجة الحرارة الوسطية للحملة المولفة من فرشاة الوقود الدوامية T_{FB} وسطح التسخين

$$T_m = (T_{FB} + T_w) / 2 \quad \text{وتحسب كما يلي:}$$

وبناءً على الخيرات المكتسبة فإنه يمكن رفع α_c المحسوبة بالعلاقة 64.4 بمقدار 30 % لمراعاة تجمع الحبيبات الصلبة في كتل.

تحدد سطوح التسخين المركبة بعد الفزارة (Cyclon) لفرشاة الوقود الدوامية الدوّارة بشكل مشابه لسطوح مولدات البخار الأخرى.

إن انتقال الحرارة في فرشاة الوقود الدوامية المضغوطة لم يُبحث إلا بشكل قليل، ولذلك لا توجد في الوقت الحاضر طرق حساب موثوقة لعامل انتقال الحرارة، وتستخدم المعادلات الواردة أعلاه لحساب عامل انتقال الحرارة لفرشاة الوقود الدوامية المضغوطة مع بعض التحفظ.

5.5.4 تحديد السطوح الحرارية للآتمة

عامل نفوذ الحرارة

عامل نفوذ الحرارة k هو مقلوب المقاومة الحرارية وبحسب للحدران المستوية وللأنابيب الرقيقة الجدران كما يلي:

$$(67.4) \quad k = \frac{1}{1/\alpha_{out} + (\delta/\lambda)_{dirt,o} + (\delta/\lambda)_w + (\delta/\lambda)_{dirt,i} + l/\alpha_i} \quad [W/m^2 K]$$

حيث: $1/\alpha_{out}$ أو $1/\alpha_i$ المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة على الجانب الخارجي لغازات الاحتراق

أو الجانب الداخلي للمائع (الماء أو البخار أو الهواء) $[m^2 K/W]$

$(\delta/\lambda)_w$ أو $(\delta/\lambda)_{dirt,o}$ أو $(\delta/\lambda)_{dirt,i}$ المقاومة الحرارية للمجران وللطبقة المتشكلة

(الأوساخ) على السطح الخارجي المواجه لغازات الاحتراق، وعلى الجانب الداخلي

للمائع $[m^2 K/W]$

α عامل انتقال الحرارة $[W/m^2 K]$

λ عامل التوصيل الحراري $[W/m K]$

δ السماكة $[m]$.

يمكن إهمال $1/\alpha_i$ إذا كانت α_i أكبر بكثير من α_{out} ، ولكن يجب مراعاة المقاومة (δ/λ) للسطح

الخارجي ولترسبات الداخلية (الهاب، الرماد الطيار أو طبقة الأملاح المتجمعة على جدران الأنابيب).

يمكن أن ينسب عامل نفوذ الحرارة لسطوح التسخين التي تأخذ شكل حزمة من الأنابيب

على السطح الداخلي أو الخارجي أو الوسطي للأنبوب أي $A_{in} = \pi d_i l$ ، $A_{out} = \pi d_{out} l$

$A_m = 0.5 (A_{in} + A_{out})$ ، فمثلاً يصبح عامل نفوذ الحرارة منسوباً إلى السطح الوسطي للأنبوب

(بدون ترسبات الأوساخ) كما يلي:

$$(68.4) \quad k_m = \frac{1}{A_{out}/\alpha_{out} A_{out} + (A_m/2\pi\lambda l) \ln(d_{out}/d_{in}) + A_m/\alpha_i A_{in}}$$

حيث: d_{out} أو d_m القطر الخارجي أو الداخلي للأنبوب $[m]$

l طول الأنبوب $[m]$

λ عامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب $[W/mK]$.

وتصبح الاستطاعة المنتقلة:

$$(69.4) \quad Q = k_m A_m \Delta t_m \quad [W]$$

حيث: Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطي $[K]$.

يبين الجدول (4.4) قيماً تقديرية لعامل نفوذ الحرارة k للمبادلات الحرارية وسطوح التسخين.

يتراوح عامل التوصيل الحراري λ_{det} [W/m K] للأوساخ المتجمعة على السطوح الحرارية بين 0.04 و 0.07 وللجيب وبين 0.6 و 2.3 للأملح (السماة أحجار المرجل) للمتجمعة في الأنابيب وهي غنية بالحصى.

الجدول 4.4: قيم تقريبية لـ k في المبادلات الحرارية و سطوح التسخين

الوسيط الساخن/البارد	k [W/m ² K]	حالات الاستخدام
1. المبادلات الحرارية ذات استعادة الحرارة		
غاز/هواء 1 bar	10 - 35	أنابيب مسخنات الهواء الأولية
غاز/هواء (عند ضغط عالٍ)	50 - 100	مولدات البخار المضغوطة
غاز (1 bar)/ماء	15 - 70	الموفرات، مراحل استعادة حرارة الغازات
غاز (بضغط عالٍ)/ ماء	50 - 170	مولدات بخار مضغوطة
بخار/ماء	1500 - 4000	للمكثفات
2. المبادلات الحرارية المتجددة		
غاز/هواء	10 - 15	مسخنات الهواء الأولية من نوع Ljungström

سطوح التسخين اللازمة

تُحسب سطوح التسخين اللازمة (A) بالاستعانة بالاستطاعة الحرارية المنتقلة Q وعامل نفوذ الحرارة k وفرق درجات الحرارة الوسطي Δt_m .

$$A = Q / k \Delta t_m \text{ [m}^2\text{]} \quad (70.4)$$

أما فرق درجات الحرارة الوسطي فينتج من العلاقة التالية:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}) / \ln (\Delta t_{\max} / \Delta t_{\min}) \quad (71.4)$$

حيث: Δt_{\max} و Δt_{\min} الفرق الأعظم والأصغري لدرجات الحرارة بين المائع الساخن والمائع البارد (انظر المعادلات من 40.1 إلى 43.1).

مثال 5.4

يطلب تحديد مساحة سطح التسخين لمسخن ماء أولي (موفر) يجري تسخينه بغازات الاحتراق، وذلك لمولد بخار استطاعة توليده للبخار 2000 t/h ذي الضغط 250 bar.

درجة حرارة دخول الماء إلى الموفر $t_{w,ent} = 240^\circ\text{C}$ ودرجة حرارة خروجه $t_{w,exit} = 320^\circ\text{C}$.
 درجة حرارة دخول الغازات إلى الموفر $t_{G,ent} = 600^\circ\text{C}$ ودرجة حرارة خروجها $t_{G,exit} = 360^\circ\text{C}$
 عامل نفوذ الحرارة $k = 56 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

الحل

1. من الجدول (A-5) للبهار والماء في الملحق، (وعند الضغط 260 bar و $t_{w,ent} = 320^\circ\text{C}$ و $t_{w,exit} = 320^\circ\text{C}$ للماء) يمكن الحصول على انتالي ماء التغذية عند درجة حرارة الدخول والخروج كما يلي:

$$h_{w,exit} = 1438.6 \text{ KJ / kg}$$

$$h_{w,ent} = 1041.3 \text{ KJ / kg} \quad \text{أو:}$$

2. التدفق الكتلي لماء التغذية يبلغ:

$$m_w = m_v = 2000 / 3.6 = 555.56 \text{ kg/s}$$

3. الاستطاعة الحرارية المتبادلة:

$$Q = m_w (h_{w,exit} - h_{w,ent}) = 555.56 \text{ kg/s} \times$$

$$(1438.6 - 1041.3) \text{ KJ/kg} = 220.72 \text{ MW}$$

4. فرق درجات الحرارة الأعظمي والأصغري في الجريان المتعاكس (Counterflow):

$$\Delta t_{max} = t_{G,ent} - t_{w,exit} = 600 - 320 = 280 \text{ K}$$

$$\Delta t_{min} = t_{G,exit} - t_{w,ent} = 360 - 240 = 120 \text{ K}$$

5. فرق درجات الحرارة الوسطي لجريان متعاكس :

$$\Delta t_{CF} = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln (\Delta t_{max} / \Delta t_{min}) = 188.8 \text{ K}$$

6. معرفة:

$$P = \Delta t_w / (t_{G,ent} - t_{w,exit}) = (320 - 240) / (600 - 240) = 0.222$$

$$R = \Delta t_G / (t_{G,ent} - t_{w,exit}) = (600 - 360) / (600 - 240) = 0.5$$

وبالتالي ينتج عامل التصحيح $f = 0.5$.

7. من أجل جريان متصالب يصبح فرق درجات الحرارة الوسطي:

$$\Delta t_m = f \cdot \Delta t_{CF} = 0.5 \times 188.8 = 94.4 \text{ K}$$

8. ينتج الآن سطح الموفر كما يلي:

$$\begin{aligned}
 A &= Q/k \cdot \Delta t_m \\
 &= 220.72 \times 10^6 \text{ W} / 56 \text{ W/m}^2\text{K} \times 94.4 \text{ K} \\
 &= 41748.6 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

6.5.4 دراسة (تصميم) مسخن الهواء الأولي المتجدد

أنواع مسخنات الهواء الأولية

تُخَفِّضُ درجة حرارة غازات الاحتراق باستخدامها لتسخين الهواء تسخيناً أولياً، ويؤدي هذا إلى رفع مردود مولد البخار. تتعلق درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة بسطح المسخن الأولي للهواء، ويجب أن لا تنخفض درجة حرارة الغازات إلى حدٍّ أدنى من درجة تكاثف الغازات، وذلك تحاشياً لخطر الصدأ وتجمع الرواسب والغبار على الصفائح الرطبة. عملياً تكون درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة لمولد البخار أعلى من 110 °C.

تجدر الإشارة إلى أن عيب درجة حرارة الاحتراق الشديدة الارتفاع هو تسببها في زيادة تشكل أكسيد الآزوت. تصل درجات الحرارة الأعظمية عند إحراق الوقود مع تفريغ الخبث بالحالة السائلة إلى 420 °C وذلك عند إحراق الفحم البني مع طرد الرماد بالحالة الجافة، وإلى 350 °C عند إحراق الوقود الغازي والسائل وإلى 320 °C للفحم الحجري المطحون الذي يطرح رماده بالحالة الجافة وتصل إلى 250 °C لفرشة الوقود السائلة وإلى 150 °C عند إحراق الفحم في المصّبات.

يُستَخدَمُ لمسخنات هواء مولدات البخار في محطات توليد الطاقة نوعان هما: المسخنات المتحددة والمسخنات الاسترجاعية.

مسخنات الهواء الأولية المتجددة

تستخدم في مولدات البخار الكبيرة غالباً مسخنات الهواء المتجددة. للمسخن المتجدد كتلة تخزين تتألف من عدد كبير من الأقنية التي هي عبارة عن شرائح رقيقة من الصاج (سمكها حوالي 0.5 mm)، وبالتالي فمساحة سطحها كبيرة. هناك نوعان من المسخنات المتجددة:

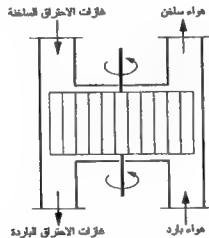
— كتلة التخزين دوارة وموضوعة في غلاف ثابت (ساكن)

— كتلة التخزين ساكنة والغلاف دوّار

يُمرَّرُ على كتلة التخزين أولاً غازات الاحتراق الساخنة ثم هواء بارد، وذلك من خلال الأقنية المخصصة لكل وسيط (الهواء والغاز). مسخن كتلة التخزين بسرعة بسبب سطحها الكبير وبفعل

الحرارة التي تتلقاها من غازات الاحتراق، ثم تقوم بإعطاء الحرارة التي خزنتها إلى تيار الهواء البارد. وبسبب الضغط المرتفع في جهة الهواء مقارنةً بجهة غازات الاحتراق ينشأ تيار تسرب يتم تحاشيه باستعمال حشوات إحكام.

يبين الشكل (18.4) وبشكل تخطيطي مبدأ عمل مسخن الهواء الأولي الدوار من نوع Ljungström له كتلة تخزين بطيئة الدوران. يكون التور ذا محور أفقي أو شاقولي. في النوع المسمى Stator تكون كتلة التخزين ساكنة بينما تدور حولها وصلات الهواء وغازات الاحتراق.



الشكل 18.4 : مخطط يبين مبدأ عمل مسخن الهواء الأولي المتجدد من نوع Ljungström.

مسخن الهواء الأولي الاسترجاعي: تنفذ هذه المسخنات في أكثر الأحيان على شكل أنابيب وأحياناً على شكل صفائح. يحدث انتقال الحرارة بين تيار غازات الاحتراق وتيار الهواء الواجب تسخينه في داخل حزمة الأنابيب عبر جدار الأنبوب، ومن حسنات مسخنات الهواء الأنبوبية عدم وجود أية أجزاء متحركة. تعمق الأوساخ التي تتجمع بفعل الرماد الطيار على سطوح التسخين التيار الحراري المنقول وترفع ضياع الضغط من جهة غازات الاحتراق.

تحديد سطح التسخين لمسخن الهواء الأولي المتجدد

لتصميم مسخنات الهواء الأولية الاسترجاعية تستخدم القواعد المألوفة لحساب المبادلات الحرارية الاسترجاعية، ولكن حساب المسخنات المتجددة أعقد بكثير، ويمكن أن تحسب بشكل تقريبي بنفس طريقة حساب المسخنات الاسترجاعية كما هم مبين فيما يلي:

يمكن الآن كتابة المعادلات التالية لحساب التيار الحراري Q :

— لتيار غازات الاحتراق

$$(72.4) \quad Q = m_{G,ent} C_{pG} (t_{G,ent} - t_{G,exit}) \quad [W]$$

— لتيار الهواء

$$(73.4) \quad Q = m_{A,ent} c_{pA} (t_{A,exit} - t_{A,ent}) \quad [W]$$

حيث: $m_{A,ent}$ أو $m_{G,ent}$ التدفق الكتلي لتيار غازات الاحتراق أو الهواء عند الدخول [kg/s]

c_{pG} أو c_{pA} السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق أو للهواء [J/kg K]

t_G أو t_A درجة حرارة غازات الاحتراق أو الهواء [°C].

يُحسب سطح التسخين من جهة الهواء أو جهة غازات الاحتراق كما يلي:

$$(74.4) \quad Q = k_A A_A \Delta t_m = k_G A_G \Delta t_m \quad [W]$$

حيث: k_A أو k_G عامل نفوذ الحرارة للهواء أو غازات الاحتراق [W/m²K]

A_G أو A_A سطح التسخين لكتلة التخزين من جهة الهواء أو غازات الاحتراق [m²]

Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطي بين غازات الاحتراق والهواء [K].

يتم حساب عوامل نفوذ الحرارة وفرق درجات الحرارة الوسطي بين غازات الاحتراق والهواء وفقاً للمعادلات التي وردت في الفصل الأول والفقرة 4.4. كثافة التدفق الكتلي g هي كميات

الهواء وغازات الاحتراق الإجمالية التي تعبر المقطع خلال الثانية الواحدة، وتبلغ عادة 6 إلى 8

kg/m²s. يكون عامل نفوذ الحرارة k عندئذ بين 10 و 15 W/m² K.

فرق درجات الحرارة $\Delta t_{Hot} = t_{G,ent} - t_{A,exit}$ على الجانب الحار. لمسخن الهواء الأولي (يسمى

أيضاً التلرج) يجب أن يكون على الأقل 20 K. فرق درجات الحرارة للهواء $\Delta t_A = t_{A,exit} - t_{A,ent}$

يدعى الحرارة المكتسبة (أي التي تم ربحها). عند معرفة التدفقات الكتلية ومعرفة ثلاث درجات

($t_{G,ent}$, $t_{A,ent}$, $t_{A,exit}$)، يمكن تحديد درجة الحرارة الرابعة ($t_{G,exit}$) من المعادلات المذكورة أعلاه.

يسبب التيار المتسرب (الضائع) الناشئ بفعل فرق الضغط بين الهواء وغازات الاحتراق والذي

يتعلق بتصميم مسخن الهواء الأولي وحجمه، يسبب تخفيض درجة حرارة غازات الاحتراق وتنتج

هذه الدرجة كما يلي:

$$(75.4) \quad t_G = t_{G,exit} - m_{leak} / m_{G,exit} (t_{G,exit} - t_{A,exit}) \quad [°C]$$

يُحدَّد تيار التسرب m_{Leak} (منسوباً إلى كمية غازات الاحتراق الجافة) بناءً على موازنة للعناصر وذلك عن طريق تحديد هبوط CO_2 في جهة غازات الاحتراق:

$$(76.4) \quad m_{Leak} = \Delta r_{CO_2} m_{G,ent} (1 - r_{H_2O}) / (r_{CO_2} - \Delta r_{CO_2}) \quad [kg/s]$$

يبلغ هبوط CO_2 أي Δr_{CO_2} في جهة غازات الاحتراق $(0.007 - 0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3)$.
يُحدَّد الحجمان الجزئيان r_{H_2O} و r_{CO_2} لكل من CO_2 و H_2O من حسابات الاحتراق.
يحسب التدفق الكتلي عند الخروج لغازات الاحتراق وللهواء كما يلي:

$$(77.4) \quad m_{G,exit} = m_{G,ent} + m_{Leak} \quad [kg/s]$$

$$(78.4) \quad m_{A,exit} = m_{A,ent} - m_{Leak} \quad [kg/s]$$

من مساحة المقاطع لغازات الاحتراق A_G وللهواء A_A ينتج المقطع الإجمالي لمسخن الهواء الدوار:

$$(79.4) \quad A_q = A_G + A_A = (m_{G,ent} + m_{A,ent}) / g \quad [m^2]$$

وبإضافة 10 % لمساحة الصاج يصبح قطر مسخن الهواء الأولي:

$$(80.4) \quad D = 1.1 (4 A_q / \pi)^{0.5} \quad [m]$$

سُيُعرض في المثال 6.4 حساب مسخن هواء أولي من النوع المتحد.

6.4 مثال

يطلب تحديد سطح التسخين اللازم A وكتلة التخزين m_s والقطر D لمسخن هواء أولي متحدد في مولد بخار عند الشروط التالية:

- التدفق الكتلي عند الدخول لكل من الهواء وغازات الاحتراق: $m_{G,ent} = m_{A,ent} = 765 \text{ kg/s}$
800 kg/s

- درجات الحرارة عند الدخول والخروج للهواء: $t_{A,ent} = 30^\circ\text{C}$, $t_{A,exit} = 250^\circ\text{C}$

- درجات الحرارة عند الدخول والخروج لغازات الاحتراق: $t_{G,ent} = 350^\circ\text{C}$, $t_{G,exit} = 150^\circ\text{C}$

- كثافة التدفق الكتلي: $g = 7.8 \text{ kg/m}^2\text{s}$

- عامل النفوذ الحراري للهواء: $k_A = 13 \text{ W/m}^2\text{K}$

- السعة الحرارية النوعية للهواء: $c_{pA} = 1.01 \text{ kJ/kg K}$

الحل

1. التيار الحراري المتبادل:

$$\begin{aligned} Q &= m_{A,ent} c_{pA} (t_{A,ent} - t_{A,exit}) \\ &= 764.8 \times 1.01 \times 10^{-3} (250 - 30) = 169.94 \text{ MW} \end{aligned}$$

2. فرق درجات الحرارة الوسطي بين غازات الاحتراق والهواء:

$$\begin{aligned} \Delta t_m &= (t_{G,ent} - t_{A,exit}) + (t_{G,exit} - t_{A,ent}) / 2 \\ &= (350 - 250) + (150 - 30) / 2 = 110 \text{ K} \end{aligned}$$

3. سطح التسخين اللازم من جهة الهواء وكذلك جهة الغازات:

$$\begin{aligned} A_A &= A_G = Q / k_A \Delta t_m \\ &= 169.94 \times 10^6 / 13 \times 110 = 118800 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4. السطح الإجمالي لمسخن الهواء:

$$A = A_A + A_G = 237600 \text{ m}^2$$

5. إذا كانت سماكة الصاج $\delta = 0.5 \text{ mm}$ وكتلته النوعية $\rho_s = 7800 \text{ kg/m}^3$ فإن كتلة التخزين للمسخن:

$$\begin{aligned} m_s &= A \delta \rho_s \\ &= 237600 \text{ m}^2 \times 0.0005 \text{ m} \times 7800 \text{ kg/m}^3 = 926640 \text{ kg} \end{aligned}$$

6. مقطع مسخن الهواء:

$$\begin{aligned} A_q &= (m_{G,ent} + m_{A,ent}) / g \\ &= (800 + 765) \text{ kg/s} / 7.8 \text{ kg/m}^2 \text{ s} = 200.64 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

7. يحسب قطر المسخن الآن كما يلي:

$$\begin{aligned} D &= 1.1 (4 A_q / \pi)^{0.5} \\ &= 1.1 (4 \times 200.64 / \pi)^{0.5} = 17.58 \text{ m} \end{aligned}$$

5 العنفات البخارية، المكثفات، مسخنات الماء الأولية، وحدات ماء التبريد

1.5 عنفات أويلر والمعادلة الأساسية

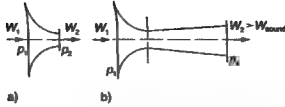
العنفات هي آلات حرارية لتحويل الحرارة إلى طاقة ميكانيكية (عمل) وذلك عن طريق تمدد وسيط عمل (بخار الماء في العنفة البخارية أو غازات الاحتراق في العنفة الغازية). تتألف العنفات عادة من عدة مراحل الشكل (1.5).

تتألف مرحلة العنفة من دولاب (عجلة) توجيه ساكن ذي فوهات مثبت على غلاف العنفة ودولاب آخر دوار ذي شفرات دوارة مثبت على محور العنفة (الدوار Rotor).



الشكل 1.5 : مراحل العنفة.

يتم في فوهة دولاب التوجيه تمدد البخار، يرافق ذلك هبوط في الانتالي وتحوله إلى طاقة حركية للبخار المتدفق، مما يؤدي إلى تسريعه. يتم الحصول في فوهة مدببة (أي مقطعها متناقص كما في الشكل a2.5) على سرعة للبخار لا تتجاوز سرعة الصوت، وللحصول على سرعة تفوق سرعة الصوت تستخدم فوهة لافال (الشكل b2.5).



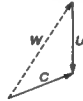
الشكل 2.5 : (a) فوهة بسيطة، (b) فوهة لافال Laval-Nozzle.

تعطى سرعة البخار c في الدولاب الدوار كمجموع شعاعي لمركبتى سرعة (الشكل 3.5) كما يلي:

$$(1.5) \quad c = u + w$$

حيث: u السرعة المحيطية للدولاب الدوار.

w سرعة البخار بالنسبة للدوار أي في المجرى الموجود بين الشفرات الدوارة.



الشكل 3.5 : مركبات سرعة البخار.

تنتج المركبة المحيطية c_u لسرعة البخار عند مقطع الدخول أو الخروج (الدليل 1 أو 2) للدولاب كما يلي:

$$(2.5) \quad c_{u2} = C_2 \cos \alpha_2 \quad \text{و} \quad c_{u1} = c_1 \cos \alpha_1$$

حيث: α هي الزاوية بين سرعة الجريان والاتجاه المحيطي.

تقدير قوى دفع تيار البخار الشفرات الدوارة للعنفة. تعطي معادلة أويلر التالية عزم الدوران الناشئ على محور العنفة

$$(3.5) \quad M = m (R_1 c_{1u} - R_2 c_{u2}) \quad [\text{Nm}]$$

حيث: M التدفق الكتلي للوسيط $[\text{kg/s}]$

R_1 و R_2 نصف القطر الوسطي لمقطع الدخول والخروج للدولاب الدوار $[\text{m}]$

c_{1u} و c_{2u} المركبات المحيطية لسرعة البخار عند مقطع الدخول والخروج للدولاب الدوار

$[\text{m/s}]$.

يسمى جلاء نصف القطر R في المركبة المحيطة الدفع، وهو عزم الدوران. تؤثر عند مقطع الدخول قوة دفع باتجاه الجريان وعند مقطع الخروج قوة عكس اتجاه الجريان. تنشأ بفعل انحراف الوسيط قوة رد فعل تؤثر على الشفرة.

تطبق العلاقة 3.5 ليس على العنفات البخارية والغازية وحسب وإنما كذلك على آلات الجريان الأخرى (المراوح، المضخات، الضواغط في محطات العنفات الغازية).

تحدد استطاعة العنفة البخارية بمساعدة معادلة أولر. تحسب استطاعة مرحلة من العنفة من عزم الدوران M [Nm] وسرعة الدوران ω [1/s] للدولاب الدوار:

$$(4.5) \quad P_s = M \omega = m (u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}) \quad [W]$$

تحسب السرعات المحيطة u_1 و u_2 عند مقطع الدخول أو الخروج للدولاب الدوار كما يلي:

$$(5.5) \quad u_1 = R_1 \omega \quad \text{و} \quad u_2 = R_2 \omega$$

ينتج العمل النوعي في المرحلة w_{st} لعنفة من الاستطاعة P_{stage} للمرحلة والتدفق الكتلي للوسيط العامل m :

$$(6.5) \quad w_{stage} = P_{stage} / m = u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u} \quad [J/kg]$$

بإجراء تحويل بسيط للمعادلة أعلاه تنتج معادلة أولر:

$$(7.5) \quad w_{stage} = \frac{1}{2} [(c_1^2 - c_2^2) + (u_1^2 - u_2^2) - (w_1^2 - w_2^2)] \quad [J/kg]$$

حيث: w_1 و w_2 مركبات (منسوبة إلى الدوار) سرعة الجريان عند مقطع الدخول والخروج للدولاب الدوار [m/s].

عند معرفة السرعات يمكن حساب تحول الطاقة في الدولاب الدوار. بحسب القانون الأول في الترموديناميك يمكن حساب عمل المرحلة النوعي بدون ضياعات كما يلي:

$$(8.5) \quad w_{st} = \Delta h_{st} + \frac{1}{2} (c_1^2 - c_2^2)$$

ولحساب هبوط الانتالي Δh_{st} عند تمدد ايزوثيرمي في الدولاب الدوار للعنفة نكتب:

$$(9.5) \quad \Delta h_{st} = h_1 - h_2 = \frac{1}{2} [(u_1^2 - u_2^2) - (w_1^2 - w_2^2)] \quad [J/kg]$$

وبمراعاة مردود الدولاب الدوار η_R تنتج سرعة الخروج خلف الدوار:

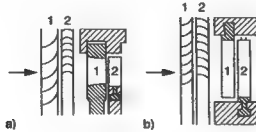
$$(10.5) \quad w_2 = w_{2u} \sqrt{\eta_R} = \sqrt{\eta_R} \{ \Delta h_{st} + \frac{1}{2} [w_1^2 - (u_1^2 - u_2^2)] \} \quad [m/s]$$

2.5 أنواع العنفات البخارية

عنفات الضغط المتساوي والضغط العالي

تُقسم العنفات تبعاً لطريقة اصطدام الوسيط بالشفرات إلى عنفات ضغط متساوي وعنفات ضغط عالٍ.

يبين الشكل (4.5) بشكل تخطيطي مرحلة ذات ضغط متساوي وأخرى ذات ضغط عالٍ.



الشكل 4.5 : (a) مرحلة الضغط المتساوي 1 - فوهة 2 - شفرات دوارة،
(b) مرحلة الضغط العالي 1 - شفرات التوجيه 2 - الشفرات الدوارة.

تتألف المرحلة في العنفة من دولاب (عجلة) توجيه ساكن ودولاب دوار ذي شفرات دوارة. يبين الشكل (a5.5) تحويلات السرعة وكذلك الضغط في المرحلة الواحدة لعنفة ذات ضغط متساوي وأخرى ذات ضغط عالٍ، ويتضح من هذا الشكل أن الضغط في العنفة ذات الضغط المتساوي يتناقص في دولاب التوجيه ويبقى في الدولاب الدوار ثابتاً. تزداد سرعة البخار C في دولاب التوجيه وتتناقص في الدولاب الدوار بحيث يجري البخار عند مدخل الدولاب الدوار ويخرجه بنفس السرعة.

يتحول هبوط الإنتالبي للمرحلة Δh_x [J/kg] في عنفة الضغط المتساوي عند تمدد البخار في فوهات دولاب التوجيه إلى طاقة حركية بشكل كامل وتصبح سرعة اندفاع البخار الذي يخرج:

$$(11.5) \quad w_2 = (\Delta h_x + w_1^2)^{0.5} \quad [\text{m/s}]$$

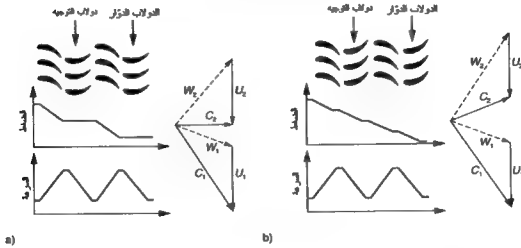
تُعرف درجة رد الفعل r لعنفة بخارية بأنها نسبة هبوط الإنتالبي في الدولاب الدوار Δh_R إلى هبوط الإنتالبي للمرحلة كلها Δh_x :

$$(12.5) \quad r = \Delta h_R / \Delta h_x$$

إن قيمة درجة رد الفعل في العنفات ذات الضغط المتساوي معدومة (تساوي الصفر).
يتم في مرحلة العنف ذات الضغط العالي استخدام هبوط الإنتالي في الدولاب الدوار ودولاب التوجيه:

$$\Delta h_{stage} = \Delta h_{GB} + \Delta H_R \quad (13.2)$$

ويرافق ذلك انخفاض للضغط p في الدولاب الدوار ودولاب التوجيه (الشكل b5.5).



الشكل 5.5 : تحويلات السرعة وشكل (بروفيل) الضغط لـ (a) عنفة ذات ضغط متساوٍ ثنائية المراحل (b) عنفة ذات ضغط عالٍ مولدة من مرحلتين.

عندما تكون درجة رد الفعل r مساوية لـ 0.5 يكون هبوط الإنتالي في دولاب التوجيه والدولاب الدوار متساوياً. تتألف مرحلة كورتيس Curtis من دولاب توجيه ودولاب دوار ذي حلقتين. يوجد بين الشفرتين الدوارتين شفرة ساكنة تعكس اتجاه حركة الجريان. يشابه تحويل السرعة وشكل (بروفيل) الضغط نظريهما في مرحلة العنف ذات الضغط المتساوي.

عدد المراحل

تُحسب السرعة المحيطية المثلى للدولاب الدوار u_{opt} من أجل عنفة ذات ضغط متساوٍ أو عالٍ كما يلي:

من أجل العنف ذات الضغط المتساوي:

$$u_{opt} = 2c_1 \cos \alpha_1 \quad (14.5)$$

ومن أجل العنفة التي درجة رد فعلها $r = 0.5$

$$(15.5) \quad u_{opt} = c_1 \cos \alpha_1$$

تقسم العنفات ذات الاستطاعات العالية إلى ثلاثة أجزاء: ذي الضغط العالي، ذي الضغط المتوسط وذي الضغط المنخفض ويكون لها ثلاثة أغلفة (صناديق).

بحسب هبوط الإنشائي الأعظمي في مرحلة واحدة لعنفة متساوية الضغط أو ذات ضغط عالٍ عندما تكون قيمة عامل رد الفعل $r = 0.5$ كما يلي:

$$(16.5) \quad \begin{aligned} \Delta h_{stage} &= \Delta h_{GB} = (2 c_1 \cos \alpha_1)^2 / 2 \\ &= (2.300)^2 / 2 \text{ (m / s)}^2 = 180 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

و:

$$(17.5) \quad \begin{aligned} \Delta h_{stage} &= \Delta h_{GB} + \Delta h_R = 2 (c_1 \cos \alpha_1)^2 / 2 \\ &= (2.300)^2 / 2 \text{ (m / s)}^2 = 90 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

تكون السرعة المحيطية في الجزء ذي الضغط المنخفض من العنفة محدودة بـ 300 m/s أما في جزئي الضغط المتوسط والعالي فإن السرعة المحيطية أصغر بسبب صغر الحجم النوعي. من أجل سرعة محيطية قيمتها 300 m/s ينتج من أجل الجزء ذي الضغط المنخفض للعنفة ذات الضغط المتساوي أو العنفة ذات الضغط العالي ما يلي:

$$\Delta h_{stage} = (2.300)^2 / 2 \text{ (m / s)}^2 = 180 \text{ kJ/kg}$$

و:

$$\Delta h_{stage} = (2.300)^2 / 2 \text{ (m / s)}^2 = 90 \text{ kJ/kg}$$

القيم النمطية (السائدة) لـ Δh_{stage} لمرحلة في الأجزاء المرتفعة أو المتوسطة الضغط للعنفة ذات الضغط العالي تتراوح بين 40 و 60 kJ/kg وفي العنفات ذات الضغط المتساوي تكون القيمة هي الضعف.

ينتج عدد المراحل n من هبوط الإنشائي الإجمالي Δh_{total} والهبوط الوسطي للمرحلة في الجزء ذي الضغط العالي أو المتوسط أو المنخفض للعنفة. يكون عدد المراحل في العنفات ذات الضغط العالي أكبر منه في العنفات ذات الضغط المتساوي.

العنفات ذات التكاليف وعنفات الضغط الخلفي

وفقاً لضغط البخار المغادر للعنفة هناك نوعان من العنفات: الأول ذو تكتيف البخار والثاني ذو الضغط الخلفي. في العنفات ذات تكاثف البخار يحدث تمدد للبخار إلى ضغط أقل من الضغط

الجوي (0.035 - 0.06 bar)، وذلك في مكثف. يتكاثف البخار عند درجة حرارة تقع بين 20 و 30 °C. يبلغ المردود الكهربائي لعملية البخار في العنفات ذات التكاثف حوالي 38 %. هنا يطرح في المكثف مع ماء التبريد حوالي 60 % من طاقة الوقود، وتُصرف هذه الحرارة إلى الوسط الخارجي. تستخدم العنفات ذات التكاثف من أجل توليد الكهرباء حصراً، أما إذا كان الغرض هو الحصول على طاقة حرارية فتستخدم عنفات ذات سحب البخار (استنزافه) عند ضغوط مختلفة. تتميز العنفات ذات الضغط الخلفي بارتفاع ضغط البخار المقادر للعنفة، وهي تستخدم في المنشآت الصناعية، حيث تتم مواءمة ضغط البخار المقادر للعنفة مع مواصفات البخار المطلوبة لمستهلك البخار أو الحرارة. ولضمان تأمين درجات حرارة المستهلك يكون الضغط عادة حوالي 1 bar. جرّاء ارتفاع ضغط البخار المقادر للعنفة يقلّ العمل المفيد للعنفة ويصبح المردود الكهربائي 30 حتى 35 % فقط. تبلغ قيمة المردود الإجمالي للمنشأة، أي نسبة الطاقة الإجمالية المفيدة (تبرار وحرارة عملية أو حرارة تسخين) إلى الطاقة التي يحملها معه الوقود المستخدم: 80 إلى 85 %.

سنتعرض في الفصل الثامن لاستخدام العنفات ذات الضغط الخلفي وللعنفات ذات سحب البخار في محطات توليد الكهرباء والحرارة معاً.

التحكم بالوحدات ذات المكثف

يُحدّد نوع التحكم السلوك الديناميكي لوحدة التوليد واستهلاك الحرارة الموافق للحمولة. وهناك نوعان لطريقة التشغيل أحدهما عند ضغط ثابت والآخر عند ضغط متدرج. عند التشغيل بضغط ثابت يبقى ضغط البخار المولّد ثابتاً بصرف النظر عن الحمل، أما عند التشغيل بضغط متدرج فيتغير ضغط البخار الطازج تبعاً للحمولة.

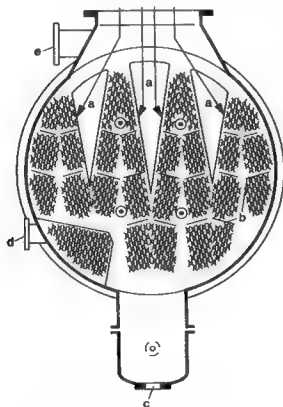
3.5 تصميم المكثفات والمسخنات الأولية لماء التغذية

المكثف - المسخن الأولي لماء التغذية - صاحب الحرارة من البخار المبرد

تستخدم في محطات الطاقة عنفات بخارية ومكثفات للبخار، بالإضافة إلى المسخنات الأولية المتجددة لماء التغذية وساحبات الحرارة من البخار ومبرّدات الماء المتكاثف، ويستخدم من أجل ذلك المبادلات الحرارية الاسترجاعية التي يجري بها انتقال الحرارة من بخار الماء المتكاثف إلى ماء التبريد أو التسخين أو ماء تغذية المرجل.

لاستغلال الحرارة بشكل أفضل تستخدم في كثير من الأحيان ساحبات الحرارة من البخار وموارد الماء المتكاثف. يُبرد البخار المحمص في ساحب الحرارة من البخار إلى درجة حرارة الإشباع عند ضغط معين، وذلك في مسخن ماء تغذية أولي يلي المحمص. يتم في مورد الماء المتكاثف سحب الحرارة من البخار المتكاثف (الماء) وإعطاؤها إلى ماء تغذية المرجل، ليتم تسخينه تسخيناً أولياً. إن المكثفات والمسخنات الأولية للماء وساحبات الحرارة من البخار المحمص هي جميعها مبادلات حرارية (heat exchangers) من النوع (ماء — بخار)، أما موارد الماء المتكاثف فهي مبادلات حرارية من النوع (ماء — ماء).

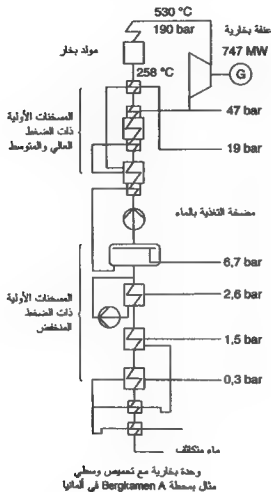
يوضح الشكل (6.5) بشكل تخطيطي مكثف عنقه بخارية.



الشكل 6.5 : مكثف العنق البخارية (a) فتحات بخار في جدار الأنبوب الحامل (b) صفائح توجيه (c) مخرج السائل المتكاثف (d) مساند امتصاص الهواء (e) فتحة تصريف عند الطوارئ.

من وجهة النظر الترموديناميكية يفضل تسخين ماء تغذية المرجل بشكل أولي بالتكثيف المباشر للبخار المستنزف في المسخنات الأولية التي تعمل بالمزج، ومن أجل n مرحلة لتسخين ماء التغذية

يلزم ($n + 1$) مضخة مياه تغذية، مما يجعل استطاعة تشغيل هذه المضخات كبيرة جداً، ولهذا تستخدم في المنشآت الكبيرة وبشكل رئيسي للمستخينات الأولية المغلقة. يتم التسخين الأولي للماء التغذية في خزان ماء التغذية بشكل مماثل تماماً لخلط التسخين الأولي عن طريق التلامس المباشر بين البخار والماء.



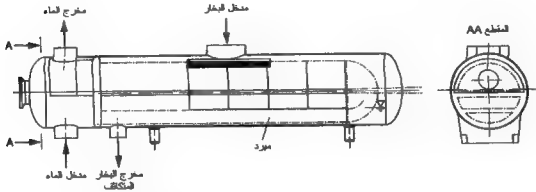
الشكل 7.5 : مخطط التوصيلات لدوري الماء والبخار.

يجري نقل ماء التغذية بمساعدة مضخة البخار المتكثف عبر سلسلة من المستخينات الأولية ذات الضغط المنخفض، وبذلك يتم تسخين ماء التغذية من درجة حرارة تكاثف الماء (حوالي 35 °C وبحسب ضغط المكثف) إلى درجة الحرارة 150 °C. تستخدم من أجل التسخين الأولي حرارة تكثيف البخار المأخوذ من العنفة. يرتفع ضغط البخار الساخن من 0.1 إلى 0.2 bar في المرحلة

الأولى إلى حوالي 10 bar في المرحلة الأخيرة ذات الضغط المنخفض قبل خزان ماء تغذية المرجل. يُبرد البخار الحار المتكاثف (الماء) أولاً في مرود خاص ثم يُنقل إلى مسخن أولي للماء ذي ضغط بخار منخفض وبهذا يمكن تحقيق ارتفاع محسوس في المرود.

يبين الشكل (7.5) مخطط مبدأ وصل دورة الماء ودورة البخار، بثلاث مسخنات أولية منخفضة الضغط، ومسخن أولي متوسط الضغط، ومسخن أولي آخر منخفض الضغط. يوجد قبل كل من المسخن الأولي ذي الضغط العالي أو ذي الضغط المتوسط صاحب حرارة من البخار، حيث يتم فيه تبريد البخار المستوف من المحمص إلى درجة حرارة الإشباع، وتنقل حرارة تحميص البخار إلى ماء التغذية.

والشكل (8.5) يبين تركيب مسخن أولي غطوي ذي ضغط منخفض مع حزمة أنابيب على شكل U. يجري ماء التغذية داخل حزمة الأنابيب (جهة الأنبوب) أما بخار التسخين فيجري بين الأنابيب (جهة الغلاف).



الشكل 8.5 : تركيب مسخن أولي ذي ضغط منخفض مع حزمة أنابيب على شكل U.

تستخدم لرفع مرود المنشأة 9 مراحل لتسخين الماء تسخيناً أولياً، وذلك بمساعدة ساحبات حرارة البخار. يتم تبريد البخار المستنزف في ساحبات حرارة البخار وإيصاله إلى درجة حرارة الإشباع. يمكن على سبيل المثال رفع درجة حرارة ماء التغذية حتى 322 °C وذلك عن طريق الاستنزاف من العنفة البخارية ذات الضغط العالي عند 113 bar و يربط ساحبي حرارة من البخار قبل ذلك لاستنزاف البخار من عنفة الضغط المتوسط.

كذلك يمكن وصل ساحبي حرارة من البخار بعد الاستنزاف من العنفة ذات الضغط العالي. يمكن ضخ الماء المتكاثف إما إلى المسخنات الأولية للماء التالية ذات الضغط المنخفض أو إلى خط تغذية الماء فوق المسخنات في ساحبات حرارة البخار المنفصلة.

تسحب حرارة التخميص للبخار المستنزف وتغطي ماء التغذية عند درجات حرارة عالية ويتدرج منخفض. التدرج ΔT هو الفرق بين درجة حرارة الإشباع للبخار ودرجة حرارة خروج ماء التغذية ويمكن أن يصل إلى 2 K -.

الاستطاعة الحرارية المتبادلة

يمكن حساب استطاعة المتبادلة في المكثف، والمسخن الأولي المقفل لماء التغذية وساحب الحرارة من البخار والمتقلبة من البخار إلى الماء من الموازنة الحرارية التالية:

$$\begin{aligned} Q &= m_v (h_v - h_c) \\ (18.5) \quad &= m_w c_{p,w} (t_{w,out} - t_{w,in}) \quad [W] \end{aligned}$$

حيث: m_v و m_w التدفق الكتلي للبخار أو ماء التبريد وماء التغذية المرحل [kg/s]

h_v و h_c الانتالي النوعي للبخار وللماء للتكاثف [J/kg]

$c_{p,w}$ السعة الحرارية النوعية للماء [J/kg K]

$T_{w,out}$ و $t_{w,out}$ درجة حرارة الدخول والخروج للماء [°C].

ويحسب التيار الحراري في مورد الماء المتكاثف من العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} Q &= m_c c_{p,c} (t_{c,out} - t_{c,in}) \\ (19.5) \quad &= m_w c_{p,w} (t_{w,out} - t_{w,in}) \quad [W] \end{aligned}$$

حيث: m_c أو m_w التدفق الكتلي للبخار المتكاثف أو ماء التغذية [kg/s]

$c_{p,c}$ أو $c_{p,w}$ السعة الحرارية للبخار المتكاثف أو ماء التغذية [J/kg K]

$t_{c,out}$ أو $t_{c,in}$ درجة حرارة الدخول والخروج للبخار المتكاثف [°C]

$T_{w,out}$ و $t_{w,out}$ درجة حرارة الدخول والخروج لماء التغذية [°C].

ويحسب سطح التسخين اللازم للمكثف أو لمسخن ماء التغذية الأولي أو لساحب حرارة البخار كما يلي:

$$(20.5) \quad A = Q / k \Delta t_m \quad [m^2]$$

حيث: k عامل نفوذ الحرارة [W/m² K]

Δt_m فرق درجات الحرارة الوسطي [K].

لحساب فرق درجات الحرارة الوسطي في المكثف أو لمسخن الأولي للماء تطبق المعادلة التالية:

عامل نفوذ الحرارة

لحساب عامل نفوذ الحرارة في مكثف أو مسخن أولي للماء أو صاحب لحرارة البخار أو مجرد الماء المتكثف، وعندما تكون الأنابيب رقيقة، يمكن استخدام المعادلة التقريبية التالية:

$$(26.5) \quad k = \frac{1}{1/\alpha_{out} + (\delta/\lambda)_{dirt,ext} + (\delta/\lambda)_w + (\delta/\lambda)_{dirt,int} + 1/\alpha_i} \quad [W/m^2K]$$

حيث: α_i أو α_{out} عامل انتقال الحرارة في الجهة الداخلية أو الخارجية

δ سماكة جدار الأنبوب أو طبقة الاتساخ

$\lambda_{dirt,ext,int}$ عامل توصيل الحرارة.

الدلائل $dirt,ext,int$ تعني جدار الأنبوب وطبقة الاتساخ في الجهة الخارجية وفي الجهة الداخلية. يحسب عامل نفوذ الحرارة عند السطح الوسطي A_m للحدران السمكية للأنابيب من العلاقة التقريبية التالية:

$$(27.5) \quad k = \frac{1}{A_m / \alpha_{ext} A_{ext} + (A_m / 2\pi \lambda l) \ln(d_{ext}/d_{int}) + A_m / \alpha_{int} A_{int}}$$

حيث: A مساحة السطح الخارجي للحدار

d قطر الأنبوب

α عامل انتقال الحرارة

λ عامل توصيل الحرارة

l طول الأنبوب

الدليل ext يشير إلى السطح الخارجي لجدار الأنبوب و int للسطح الداخلي للحدار.

يتطلب تحديد قيمة k معرفة عوامل انتقال الحرارة للجهة الداخلية والخارجية لكل من المكثف ومسخن الماء الأولي، وساحب الحرارة أو المبرد، ولحسابها تستخدم المعادلات الواردة فيما يلي.

عامل توصيل الحرارة عند تكاثف البخار

تصنع مكثفات العنفات البخارية عادة بحيث تكون حزمة من الأنابيب الأفقية. وبحسب عامل انتقال الحرارة α_v عند تكاثف غشاء البخار على السطح الخارجي لأنبوب أفقي من المعادلة التالية:

$$(28.5) \quad \alpha_v = 0.726 \{ \lambda^3 \rho^2 g h_{eve} / \mu (t_g - t_w) d_{ext} \}^{0.25} \quad [W/m^2K]$$

حيث: λ عامل توصيل الحرارة للماء المتكاثف $[W/m k]$

P الكتلة النوعية للبخار المتكاثف $[kg/m^3]$

g التسارع الأرضي $[m/s^2 \ 9.81]$

h_{evm} انتالي الكثافة (تساوي قيمة انتالي التبخر) $[J/kg]$

μ اللزوجة الديناميكية للماء المتكاثف $[Pas]$

t_s درجة حرارة الإشباع $[^\circ C]$

t_w درجة حرارة جدار الأنبوب $[^\circ C]$

d_{ext} القطر الخارجي للأنبوب $[m]$.

تؤخذ القيم المميزة للماء المتكاثف (λ , ρ , μ) عند درجة الحرارة الوسطية:

$$t_m = 0.5 (t_s + t_w)$$

أما انتالي الكثافة h_{evm} فيؤخذ عند ضغط الماء المتكاثف.

يجب تصحيح المعادلة 28.5 من أجل حزمة أنابيب أفقية تحوي n صفاً من الأنابيب التي تقع فوق بعضها البعض وتحسب قيمة α في هذه الحالة كما يلي:

$$\alpha_B = \alpha / n^{0.17} \quad [W/m^2K] \quad (29.5)$$

إذا كانت $n < 20$ يمكن عندئذ اعتبار $\alpha_B = \alpha$.

يتكثف بخار الماء في أنبوب شاقولي وحيد أو في حزمة أنابيب يُحسب عامل نفوذ الحرارة كما

يلي:

$$\alpha_v = 0.943 \{ \lambda^3 \rho^2 g h_{evm} / \mu (t_s - t_w) H \}^{0.25} \quad [W/m^2K] \quad (30.5)$$

حيث: H ارتفاع الأنبوب أو حزمة الأنابيب $[m]$.

عامل انتقال الحرارة الداخلي

ينتج عامل انتقال الحرارة α_{int} من أجل جريان داخلي للماء في أنابيب مكثف أو مسخن أولي للماء أو صاحب لحرارة البخار أو مورد للماء من علاقة رقم نوسل التالية:

$$\alpha_i = N \lambda / d_i \quad (31.5)$$

حيث: N رقم نوسل

λ عامل توصيل الحرارة للماء

d_i القطر الداخلي للأنبوب.

يُحسب رقم نوسل من أجل جريان مضطرب لماء التبريد في المكثف وفي المجال $Re > 2320$ و $Pr = 1.5 - 500$ كما يلي:

$$Nu = 0.012 (Re^{0.87} - 280) Pr^{0.4} [1 + (d_i / L)^{2/3}] (Pr / Pr_w)^{0.11} \quad (32.5)$$

حيث: $Re = w d_{int} / \nu$ رقم رينولتز

w سرعة الجريان

d_{int} القطر الداخلي للأنيوب [m]

ν اللزوجة الحركية للماء المتكاثف [m²/s]

L طول الأنبوب [m]

Pr أو Pr_w رقم برانتل للماء عند درجة حرارة متوسطة t_m أو عند درجة الجدار t_w .

تؤخذ القيم المميزة (λ , ν) ورقم برانتل Pr عند درجة وسطية للماء ($t_{w,ent} + t_{w,exit}$) $t_m = 0.5$.

يبين الجدول (1.5) قيماً استرشادية لعامل نفوذ الحرارة والتدرج ΔT من أجل مسخنات الماء الأولية وساحبات حرارة ومبردات المكثف.

الجدول 1.5: عامل نفوذ الحرارة K والتدرج ΔT لمسخنات الماء الأولية وللمبردات ولساحبات الحرارة من البخار

المبادل الحراري	k بالـ [W/m ² K]	ΔT [K]
مسخن ماء أولي ذو ضغط عالٍ	4500 – 3500	من 1 إلى 4
مسخن ماء أولي ذو ضغط منخفض ($P > bar1$)	3500 – 2500	من 3 إلى 5
مسخن ماء أولي ذو ضغط منخفض ($P < bar1$)	2500 – 1500	من 3 إلى 5
ساحب حرارة البخار لمسخن الماء الأولي	1000 – 400	
مبرد الماء المتكاثف ذو الضغط العالي	4000 – 2500	من 5 إلى 10
مبرد الماء المتكاثف ذو الضغط المنخفض	3000 – 2500	من 5 إلى 10

ضخاع (هبوط) الضغط في مكثف عنفة بخارية

يتألف ضخاع الضغط الإجمالي Δp من جهة ماء التبريد في مكثف من الضخاع في الأنبوب بفعل الاحتكاك Δp_{fr} وضخاعات الضغط عند وصلات دخول ماء التبريد وخروجه $\Delta p_{CW,ent}$ و

$\Delta p_{CW,exit}$ وضخاعات الضغط عند مدخل الأنبوب وخروجه (Δp_{ent} و Δp_{exit})

$$\Delta p = \Delta p_{fr} + \Delta p_{CW,ent} + \Delta p_{CW,exit} + \Delta p_{ent} + \Delta p_{exit} \quad [Pa] \quad (33.5)$$

أما ضخاع الاحتكاك في الأنبوب فهو:

$$\Delta p_f = \lambda (L/d) \rho w^2 / 2 \quad [\text{Pa}] \quad (34.5)$$

حيث: λ عامل الاحتكاك في الأنبوب

L و d طول الأنبوب وقطره $[m]$

ρ الكتلة النوعية لماء التبريد $[\text{kg/m}^3]$

w سرعة ماء التبريد $[\text{m/s}]$.

ومن أجل الأنابيب الملساء هيدروليكيًا (مثلًا النحاس الأصفر) تطبق العلاقة التالية:

$$\lambda = 0.3164 / Re^{0.25} \quad (35.5)$$

حيث: $Re = w d / \nu$ رقم رينولدز

ν اللزوجة الحركية للماء $[\text{m}^2/\text{s}]$

تحدد المقاومات المختلفة $\Delta p_{CW,ent}$ ، $\Delta p_{CW,exit}$ ، Δp_{ent} و Δp_{exit} كما يلي:

$$\Delta p = \xi \rho w^2 / 2 \quad [\text{Pa}] \quad (36.3)$$

كما تحسب عوامل المقاومة ξ كما يلي:

$$\xi_{ent} = 0.25 - 0.3; \xi_{exit} = 0.5 - 0.6$$

$$\xi_{CW,ent} = (1 - A_{ent} / A_{w,ent})^2$$

$$\xi_{CW,exit} = 0.42 (1 - A_{exit} / A_{w,exit}) \quad (37.5)$$

حيث: A_{ent} و A_{exit} مساحة المقطع الإجمالية لوصلات دخول ماء التبريد أو خروجه

$A_{w,ent}$ أو $A_{w,exit}$ المساحة الإجمالية لأرضية حجرة الماء عند الدخول أو الخروج.

يشكل ضياع الضغط في الأنابيب حوالي 80 % من ضياعات الضغط الإجمالية في المكثف.

4.5 وحدات ماء التبريد

يتم طرح حرارة التكاثر من المكثف عن طريق ماء التبريد، ويتج التيار الحراري المطروح من

الموازنة الحرارية للمكثف:

$$Q_R = m_v \Delta h = m_w c_{pw} \Delta t_w \quad [\text{W}] \quad (38.5)$$

حيث: Q_R التدفق الكتلي للبخار $[\text{kg/s}]$

Δh فرق الإنتالبي بين البخار والبخار المتكاثف [J/kg]

m_{wv} التدفق الكتلي لماء التبريد [kg/s]

c_{pw} السعة الحرارية النوعية لماء التبريد [J/kg K]

Δt_w فرق درجات الحرارة لماء التبريد بين مخرج المورد ومدخله [K].

من أجل سطح تبريد معلوم A في مكثف فإن فرق درجات الحرارة لماء التبريد بحسب كما يلي:

$$(39.5) \quad \Delta t_w = t_{w,exit} - t_{w,ent} = (t_s - t_{w,ent}) - [1 - \exp(-k A / m_{wv} c_{pw})] \quad [K]$$

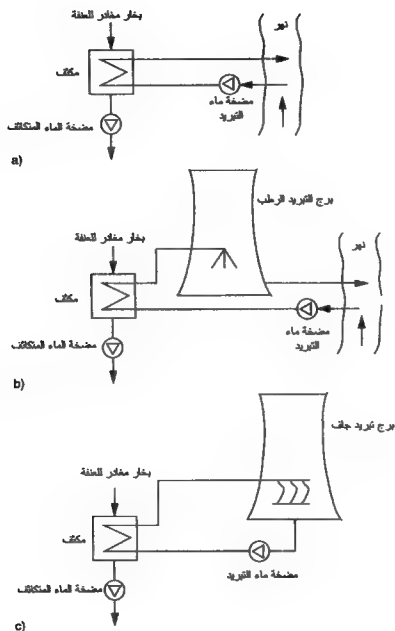
حيث: $t_{w,exit}$ أو $t_{w,ent}$ درجة حرارة الخروج أو الدخول لماء التبريد في المكثف [K]

t_s درجة حرارة الإشباع عند ضغط المكثف [°C]

K عامل نفوذ الحرارة [W/m²K].

يبين الشكل (10.5) وحدات تبريد الماء المستخدمة في محطات الطاقة بشكل تخطيطي، ثمة ثلاثة أنواع من وحدات التبريد ذات الماء الجاري وذات الماء المنفلت (الضائع) وذات الماء الذي يعاد تدويره. يبين الشكل (a10.5) الوحدة ذات الماء الجاري. يؤخذ الماء من التيار الجاري ويُقَي إلى الشوالب الميكانيكية ثم يضخ إلى مكثف العنف، ومن هناك يعاد ماء التبريد الذي أصبح دافئاً إلى النهر ثانية. من وجهة النظر الترموديناميكية فإن هذه الوحدة هي الأفضل، ولكن ذلك يشكل عبئاً حرارياً على الماء، ولذلك لا تُستخدم إلا بشكل محدود. أما في الوحدة ذات المائع الضائع (الشكل b10.5) فيوصل بعد المكثف وقبل الوصول إلى مجرى الماء الرئيسي برج تبريد رطب، وتكمن ميزة هذه الطريقة في قلة الحرارة المنقولة إلى مجرى الماء (النهر)، أما عيبها فهو التكاليف الإضافية لبرج التبريد. الطريقتان المذكورتان أعلاه مناسبتان فقط في المواقع التي تتوافر فيها المياه بكميات كافية. أما في وحدة التبريد من النوع الثالث، أي ذات الماء الذي يعاد تدويره، فيجري تبريد ماء التبريد في برج جاف أو رطب ثم يعاد سوقه إلى المكثف ثانية. يجري تعويض ضياعات الماء التي تحصل في برج التذير بالتطاير أو التذير أو مع الأوحال عن طريق إضافة مياه جديدة. ويبين الشكل (c10.5) وحدة تبريد الماء ذات إعادة تدوير الماء مع برج تبريد جاف، وتعتبر هذه الطريقة أسلوب تبريد جاف غير مباشر. وبهذا يُساق ماء التبريد من مكثف العنف إلى برج تبريد جاف عبر مكثف سطحي (مقل) أو مكثف حقن بعد أن يكون بُرد بالهواء المحيط ثم يُعاد إلى مكثف العنف ثانية.

٤



الشكل 10.5 : (a) وحدة تبريد الماء ذات الماء الجاري (b) وحدة تبريد الماء ذات الماء الضائع (c) وحدة تبريد الماء ذات إعادة تدوير الماء.

يستخدم في وحدات التبريد المحيطة (المختلطة) بشكل ممتاز خليط من التبريد الجاف والرطب. تستخدم في محطات الطاقة لإرجاع ماء التبريد إلى مكثف الحنفة أبراج تبريد جافة ورطبة.

يُرش في برج التبريد ماء التبريد الساخن (تدفقه الكتلي m_w [kg/s] ودرجة حرارته t_w) فيتطاير جزء صغير من الماء (Δm_w) مما يؤدي إلى تناقص درجة حرارة ماء التبريد. عن طريق إضافة ماء إضافي (بتدفق Δm_w ودرجة حرارة t_w) فإن كمية الماء المغادر من ماء التبريد تكون مساوية لـ m_w ولها درجة حرارة $t_{w,exit}$. يسخن تيار الهواء الصاعد في برج التبريد (تدفقه الكتلي m_A بالـ kg من الهواء الجاف في الثانية) وترتفع رطوبته وتزداد قيمته الاتتالي ومحتوى الرطوبة للهواء من القيم المقابلة للهواء الخارج h_1 و x_1 إلى قيم توافق الخروج من برج التبريد h_2 [جول لكل كغ هواء جاف] و x_2 (كغ بخار ماء لكل كغ هواء جاف).

من موازنة الكتل في برج التبريد الرطب ينتج التدفق الكتلي لماء التبريد المتطاير أو كمية الماء اللازم إضافتها:

$$\Delta m_w = m_A (x_2 - x_1) \quad [\text{kg/s}] \quad (40.5)$$

ومن الموازنة الحرارية لجملة التبريد التي تتألف من المكثف وبرج التبريد الرطب، تنتج استطاعة التبريد.

$$Q = m_w c_{pw} \Delta t_w = m_A \Delta h_A - m_w c_{pw} \Delta t_w \quad [\text{W}] \quad (41.5)$$

حيث: $\Delta h_A = h_2 - h_1$ ارتفاع الإتنالي للهواء في برج التبريد [J لكل kg هواء جاف].

ومنه ينتج استهلاك الماء الإضافي المنسوب لكل 1 kg من ماء التبريد

$$\Delta m_w / m_w = c_{pw} \Delta t_w / (\Delta h_A / \Delta x_A - c_p \Delta t_w) \quad [\text{kg/kg}] \quad (42.5)$$

بالمقارنة مع وحدة التبريد ذات الماء الجاري ينتج أن استهلاك الماء المضاف يبلغ 1.5 إلى 2 %. على سبيل المثال، من أجل محطة طاقة وقودها الفحم البني واستطاعتها الكهربائية MW 880 يستخدم برجا تبريد ارتفاعهما 162 m وتصل حدود التبريد إلى 9 K. التدفق الكتلي لماء التبريد $m_w = 27879 \text{ kg/s}$. عند تصميم أبراج التبريد الرطبة فإن فرق درجات الحرارة لماء التبريد Δt_w يعتبر عرض منطقة التبريد، كذلك يعتبر الفرق في درجات الحرارة بين الماء البارد والهواء الجاف حدّ التبريد. يجب أن تقدم مضخات ماء التبريد عندما يكون عرض منطقة التبريد 8.16 K كمية من الماء البارد قدرها 10^5 t كل ساعة ($m_w = 27876 \text{ kg/s}$).

تُقدّ غازات الاحتراق المغادرة للمولد في مشاريع محطات الطاقة الحديثة إلى الوسط الخارجي بحيث تكون أعلى من أبراج التبريد. هناك الأنواع التالية من أبراج التبريد الجافة:

- وحدة مبردة بشكل مباشر مع تكييف.
 - وحدة مبردة بشكل غير مباشر بدون تكييف.
 - أبراج تبريد ذات قوة قسرية عن طريق مراوح.
 - أبراج تبريد ذات سحب طبيعي.
- والأبراج الأكثر شيوعاً هي الأبراج الرطبة ذات السحب الطبيعي، وفي حالات قليلة تستعمل الأبراج الرطبة مع مراوح.

مثال 1.5

يطلب تحديد مساحة التبريد والتدفق الكتلي لماء التبريد لمكثف عنفة بخارية عند الشروط التالية:

- الاستطاعة الكهربائية للمحطة $P_{el} = 700 \text{ MW}$
- المردود الكهربائي للمحطة $\eta_{el} = 40\%$
- ضغط المكثف 0.05 bar
- درجة حرارة الدخول و الخروج لماء التبريد في المكثف هي 16°C و 26°C
- عامل نفوذ الحرارة $k = 2300 \text{ W/m}^2 \text{ K}$.

الحل

1. درجة حرارة الإشباع عند الضغط $p = 0.05 \text{ bar}$ تبلغ $33^\circ \text{C} \approx 32.898^\circ \text{C}$ (انظر الجدول A5 في الملحق).

2. فرق درجات الحرارة الوسطي بين البخار والماء:

$$\Delta t_m = (\Delta t_{max} - \Delta t_{min}) / \ln (\Delta t_{max} / \Delta t_{min})$$

$$= [(133 - 16) - (33 - 26)] / \ln [(133 - 16) - (33 - 26)] = 11.3 \text{ K}$$

3. الاستطاعة الحرارية التي تطرح من المكثف مع ماء التبريد (Q_r) تحسب من الفرق بين الاستطاعة الحرارية المضافة والاستطاعة الكهربائية

$$Q_r = Q_{ad} - P_{el} = P_{el} / \eta_{el} - P_{el}$$

$$= 700 \text{ MW} / 0.40 - 700 \text{ MW} = 17150 - 700 = 1050$$

4. سطح التبريد اللازم في المكثف:

$$A = Q_r / k \Delta t_m$$

$$= 1050 \times 10^6 \text{ W} / 2300 \text{ W/m}^2 \text{ K} \times 11.3 \text{ K} = 40400 \text{ m}^2$$

5. السعة الحرارية النوعية لماء التبريد عند درجة حرارة وسطية $21^{\circ}\text{C} = (16 + 26) / 2$ تبلغ J/kgK

4182 (انظر الجدول 14.A في الملحق).

6. التدفق الكتلي لماء التبريد يصبح:

$$\begin{aligned} m_w &= Q_R / C_{pw} \Delta t_w \\ &= 1050 \times 10^6 \text{ W} / 4182 \text{ J/kgK} \times (26 - 16) \text{ K} \\ &= 25107.6 \text{ kg/s} = 90387 \text{ t/h} \end{aligned}$$

6 تخفيض إطلاق محطات الطاقة لغازات

الاحتراق الضارة

1.6 إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2

انبعاث الغازات الضارة

عند إحراق الوقود للمستحاثي في محطات توليد الطاقة فإنه يتم إطلاق غاز ثاني أكسيد الكربون ذي التأثير الكبير على المناخ بالإضافة إلى الغازات الضارة التالية:

— من وقود الفحم: ثاني أكسيد الكبريت SO_2 ، أكاسيد النتروجين (الآزوت) NO_x ، أول أكسيد الكربون CO ، المركبات الهالوجينية مثل HCl و HFI ، الفبار بالإضافة إلى الحث والرمد.

— من الوقود السائل (زيت الوقود): SO_2 ، NO_x ، CO ، الهيدروكربونات C_mH_n والهباب (soot).
— من الغاز الطبيعي: NO_x ، CO ، C_mH_n .

لا يحتوي الغاز الطبيعي على كبريت، وكذلك لا ينطلق عند الاحتراق الكامل إلا NO_x ، أما CO و C_mH_n فهي تتشكل فقط عند الاحتراق غير الكامل، ويمكن تخفيض إصدار NO_x و CO في المنشآت التي تحرق الوقود الغازي بشكل كبير عن طريق إجراءات احتراق مناسبة. أي أنه يمكن اعتبار الغاز الطبيعي وقوداً نظيفاً، ولكن للأسف فإن احتياطي الغاز الطبيعي صغير نسبياً. كما أن أنواع الوقود الغازي الأخرى، مثل الغازات الناتجة عن تفوير الفحم (تحويله إلى غاز) تعتبر أيضاً رقيقة بالبيئة بعد معالجتها.

يتشكل عند إحراق الوقود السائل مقدار أكبر بكثير من الغازات الضارة، وذلك مقارنة بالوقود الغازي. وعلى سبيل المثال فعند إحراق الوقود السائل (فيول أويل) الخفيف (EL) الذي يحوي قدراً

صغيراً جداً من الكبريت مقارنة بالوقود الثقيل، عندئذ تنطلق بشكل رئيسي NO_x ، بينما يكون إطلاق SO_2 مرتفعاً نسبياً عند إحراق الوقود الثقيل.

تؤدي الفحم، وخاصة الفحم البني البيئة بأكثر درجة، وذلك مقارنة بأنواع الوقود الأخرى. ومنتجات الزيوت المعدنية أكثر رفقاً بالبيئة، أما الغاز الطبيعي فيمكن إحراقه بإطلاق ضئيل جداً للغازات الضارة (مثلاً في منشآت العفقات الغازية).

إن الغازات الضارة الناتجة عن الاحتراق في معدات الاحتراق ومحطات توليد الطاقة والمواصلات تؤدي الهواء والماء والأرض، وتؤثر مباشرة على هواء التنفس وماء الشرب والأغذية، وعلى الإنسان والحيوان، وأبعد من ذلك فهي تضر عالم النبات وتؤدي الأتربة.

وقد بلغ انبعاث الغازات الضارة من محطات توليد الطاقة في ألمانيا عام 1990 (بملايين الأطنان/العام) كما يلي: الغبار 0.17 ، SO_2 1.96 ، NO_x 0.93 ، C_mH_n 0.01 ، ويمكن تخفيضها باستخدام إجراءات أولية (مرتبطة بالوقود وطريقة إحراقه)، أو إجراءات ثانوية (مرتبطة بغازات الاحتراق الناتجة). كذلك يجب التخلص من المياه الملوثة والفضلات الناتجة عن معدات معالجة غازات الاحتراق بشكل ملائم للبيئة.

انبعاث CO_2 النوعي

غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 غاز مهم للمناخ، وهو يساهم في التسخين الإجمالي للأرض حيث يلعب دور البيت الزجاجي على الأرض. يجب تقليل انبعاث CO_2 بمحدود 50 %، ولا يمكن الوصول إلى ذلك إلا عن طريق الإقلال من استهلاك الوقود. لهذا يجب رفع مردود عمليات تحويل الطاقة واستخدامها بشكل كبير.

يُحسب مقدار CO_2 المنطلق لكل 1 MJ من الحرارة المتحررة بالاحتراق كما يلي:

$$(1.6) \quad g_{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} / \text{LCV} \quad [\text{kg/MJ}]$$

حيث: V_{CO_2} كمية غاز ثاني أكسيد الكربون [m^3 لكل 1 kg وقود صلب أو سائل لكل m^3 وقود غازي]

ρ_{CO_2} الكثلة النوعية عند الشروط النظامية (1.977 kg/m^3)

LCV القيمة الحرارية الدنيا [MJ لكل 1 kg وقود صلب أو سائل أو لكل m^3 وقود غازي].

يحسب الانبعاث النوعي لـ CO_2 من محطة توليد طاقة لكل 1 kWh من الطاقة الكهربائية المقدمة كما يلي:

$$g'_{\text{CO}_2} = 3.6 V_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} / \text{LCV } \eta_{\text{ps}} \quad (2.6)$$

$$= 3.6 g_{\text{CO}_2} / \eta_{\text{ps}} \quad [\text{kg/kWh}]$$

حيث: η_{ps} مردود محطة توليد الطاقة.

كلما ارتفع مردود محطة الطاقة، قلَّ الانبعاث النوعي لـ CO_2 من أجل كل 1 kWh لهذه المحطة، ولذلك فإن رفع المردود إجراء مهم لتقليل إصدار CO_2 .

الجدول 1.6: القيم المحسوبة للانبعاث النوعي لـ CO_2 — g_{CO_2} بالـ kg/MJ وكذلك g'_{CO_2} بالـ kg/kWh لمختلف أنواع الوقود

نوع الوقود	LCV	η_{ps}	V_{CO_2}	g_{CO_2}	g'_{CO_2}
فحم بني	9.63	0.36	0.56	0.1147	1.1147
فحم حجري	31.4	0.40	1.5	0.0949	0.854
وقود سائل خفيف	42.7	0.44	1.61	0.0751	0.615
غاز طبيعي	37.5	0.44	1.07	0.0554	0.54

مثال 1.6

يطلب حساب مقدار CO_2 المنطلق لكل 1 MJ طاقة حرارية متحررة أو لكل kWh استطاعة كهربائية من أجل محطات الطاقة التي تحرق أنواعاً مختلفة من الوقود. يعطي الجدول (1.6) القيم الحرارية الدنيا لأنواع الوقود LCV (بالـ MJ لكل kg وقود صلب أو سائل أو لكل 1 m³ وقود غازي) وكذلك كمية غاز ثاني أكسيد الكربون V_{CO_2} المنطلقة (بالـ m³ لكل kg وقود صلب أو سائل أو لكل 1 m³ وقود غازي) وكذلك القيم المحسوبة لـ g_{CO_2} و g'_{CO_2} .

الحل

تعطي المعادلات 1.6 و 2.6 القيم التالية:

$$g_{\text{CO}_2} = 0.56 \times 1.977 / 9.63 = 0.1147 \text{ kg/MJ} \quad \text{مثلاً للفحم البني:}$$

$$g'_{\text{CO}_2} = 3.6 \times 0.1147 / 0.36 = 1.147 \text{ kg/kWh}$$

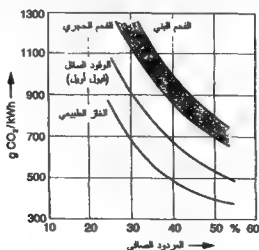
بطريقة مماثلة تحسب هذه القيم من أجل أنواع الوقود الأخرى، والنتائج مبينة في الجدول (1.6).

أما الجدول (2.6) فيتضمن معطيات عن القيم العملية للانبعاث النوعي لـ CO_2 لمحطات الطاقة المختلفة التي تحرق أنواعاً مختلفة من الوقود.

الجدول 2.6: الانبعاث النوعي لـ CO_2 من محطات الطاقة [kg/kWh]

انبعاث [kg/kWh] CO_2	الوقود المستخدم	الاستطاعة [MW]	نوع محطة الوقود
1.16-1.04	فحم بني	800	محطة بخارية مزودة بمحركات تنقية غازات الاحتراق
0.83	فحم حجري	700	محطة بخارية مزودة بمحركات تنقية غازات الاحتراق
0.91	فحم بني	300	محطة دائرة مركبة (بخارية + غازية) يحول الفحم فيها إلى غاز
0.79	فحم حجري	300	محطة دائرة مركبة يحول الفحم فيها إلى غاز
0.76	وقود سائل ثقيل	400	محطة بخارية
0.58	غاز طبيعي	150	محطة عنفة غازية
0.45	غاز طبيعي	400	محطة بخارية
0.38		600	محطة دائرة مركبة
0.025		1300	محطة نووية — المفصل ذو الماء المضغوط
0.15-0.1		80	محطة شمسية
0.2-0.15		6	منشأة فوتوفولطية
0.02		3	منشأة طاقة الرياح
0.004		20	محطة مائية

يمكن تخفيض انبعاث CO_2 عن طريق رفع مردود محطة الطاقة أو الاستعاضة عن وقود معين بوقود آخر. يكون الانبعاث أعظمياً عند إحراق الفحم البني وأصغرياً عند إحراق الغاز الطبيعي.



الشكل 1.6: الإصدار النوعي لمحطات توليد الطاقة وعلاقته بالمرود الصافي وبنوع الوقود.

يبين الشكل (1.6) تخطيطاً الانبعاث النوعي لمخططة الطاقة وعلاقته بالمردود الصافي وبنوع الوقود.

بلغ إجمالي إصدار العالم من CO_2 عام 1990 القيمة التالية: $\text{Mio t/a } 22108$ (طن/العام)، نصيب الولايات المتحدة منها (بملايين الأطنان/العام) 5389، وأوروبا 4674 والاتحاد السوفيتي السابق 1006، واليابان 1153 وتعتبر عملية تخفيض انبعاث CO_2 أمراً يجب إيلاؤه بالغ الاهتمام. بلغ الإطلاق الإجمالي لمخططات الطاقة في ألمانيا عام 1990 (بملايين الأطنان/العام) $\text{t/a } 348$. ستعالج فيما يلي الوسائل الهندسية لسحب الغبار والكبريت والأزوت من غازات الاحتراق.

2.6 سحب الغبار

أنواع ساحبات الغبار

تتطلب من أجهزة الاحتراق في الغالب البقايا التالية: رماد عشن أو خبث أو رماد متطاير أو غبار ناعم. تتعلق كميات هذه المواد بتركيب الوقود وطريقة إحراقه، وينطلق الجزء الأكبر من الغبار عند إحراق الفحم والخشب والقمامة. لتقليل انبعاث الغبار تستخدم الساحبات التالية:

- ساحبات الغبار باستخدام قوة الثقالة وقوة العطالة.
- الساحبات الدوارة التي تستخدم القوة النابذة.
- المصافي الكهربائية والمصافي النسيجية (محيوط نسيجية).
- المصافي الرطبة.

درجة السحب (التقية)

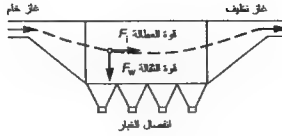
تحدد درجة السحب كما يلي:

$$\eta_{\text{Full}} = (1 - b_1 / b_2) 100 \% \quad (3.6)$$

حيث: b_1 أو b_2 نسبة تواجد الغبار في غازات الاحتراق عند مدخل صاحب الغبار وعند مخرجه $[\text{g/m}^3]$.

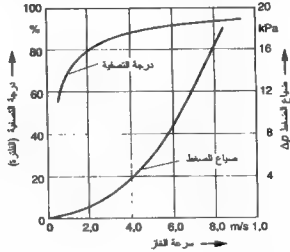
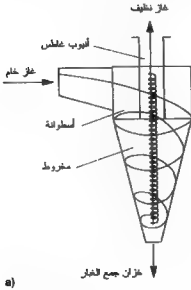
ساحبات الغبار باستخدام قوة الثقالة (فلاتر الثقالة)

تتبع مصافي (فلاتر) الثقالة والعطالة لزمرة للمصافي الكتلية التي تقسم بناءً على القوة المؤثرة على عملية التصفية (الفلترة) إلى مصافي الثقالة والعطالة والقوة النابذة (الشكل 2.6).



الشكل 2.6 : مبدأ عمل المصافي الكتلية.

تتعلق درجة السحب (الفترة) في مصافي قوة الثقالة بفروق الكثافة بين الغاز والحبيبات الصلبة وبفترة بقاء غازات الاحتراق في المصفاة. إذا تعرض مزيج الغاز والحبيبات الصلبة إلى تغيير في اتجاه الجريان فإن انفصال الحبيبات الصلبة يحدث بفعل قوة الثقالة مع قوى العطالة [1].



الشكل 3.6 : السيكلون (الساحبات الدورانية) (a) مخطط مبدأ العمل (b) درجة التصفية وضياح الضغط.

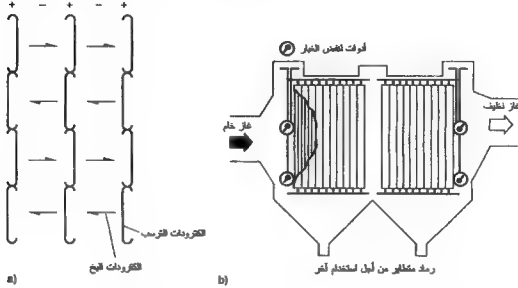
ساحبات الغاز الدورانية (السيكلون)

تعتمد على فرق الكثافة الكبير بين الغاز والحبيبات الصلبة وهي مناسبة لتصفية الحبيبات الكبيرة (الشكل 3.6).

* رقم المرجع (مبين في آخر الكتاب) — المراجع.

المصافي الكهربائية

يستخدم لهذه المصافي توتر (جهد، ضغط) كهربائي عالٍ، وهي تقوم بفصل حبيبات الغبار من تيار غازات الاحتراق. ومبدؤها مبين في الشكل (4.6).



الشكل 4.6 : للمصافي الكهربائية (a) مخطط مبدأ العمل (b) التركيب.

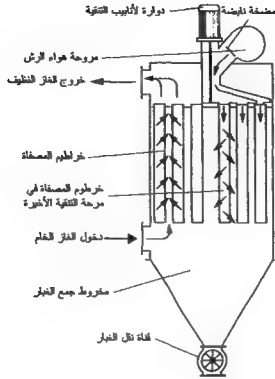
تتألف المصفاة الكهربائية من أقطاب متوازية مشحونة إيجابياً (صفائح رقيقة مؤرضة) وبرادة مشحونة سلباً تتوضع بين الصفائح. تنشأ في المصفاة عند مرور غازات الاحتراق عملية تأين (تحول إلى شوارد ذات شحنة كهربائية) لهذه الغازات فتقوم الإلكترونات الأولية الحرة بطرد الإلكترونات أخرى من جزيئات الغاز (ظاهرة كورونا). إذا مرّرت غازات الاحتراق بالغبار بين الصفائح فإن جزيئات الغاز المشحونة سلباً تتجمع معاً مشكلةً جسيمات. تنتقل هذه الجسيمات إلى الأقطاب الموجبة حيث تفقد شحنتها هناك وتسقط في خزان جمع حبيبات الغبار. أما حوامل الشحنات الموجبة من الغازات فتتجمع على أقطاب البرادة. يبين الشكل (4.6b) تركيب مصفأة كهربائية.

هذه المصافي مناسبة لسحب الجسيمات التي تتراوح أبعادها بين 10^{-3} و 10^{-10} μm .

تتعلق درجة التنصيف (الفترة) لمصفاة كهربائية بالتلفق الحجمي للغازات V وبسرعة حركة الحبيبات الصلبة في الغازات w ومساحة سطح الترسيب A وفقاً للمعادلة التالية:

$$(4.6) \quad \eta_{\text{Fe}} = 1 - \exp(-wA / V)$$

تعمل معظم المصافي الكهربائية عند درجة حرارة لغازات الاحتراق قدرها 140 °C.



الشكل 5.6 : المصفاة النسيجية (ألياف).

المصافي النسيجية

يتم فصل الحبيبات الصلبة من غازات الاحتراق في هذا النوع من المصافي عن طريق طبقة ذات مسام، وبناءً على المتطلبات تستخدم خيوط من منتجات طبيعية أو من الزجاج أو المعادن. (انظر الشكل 5.6). يتم تصميم (اختيار) المصفاة النسيجية (ذات الألياف) بناءً على سطح المصفاة المعرض لغازات الاحتراق، وتحمل المصافي ذات الألياف المصنوعة من الزجاج أو التفلون (مادة لدائنية عازلة صامدة للحرارة والرطوبة) درجة حرارة الغازات التي تبلغ 260 °C.

الجدول 3.6: مجالات انبعاث مختلف طرائق التنصيف.

طريقة التنصيف - الجهاز	درجة التنصيف	مجال الانبعاث
المصفاة الكهربائية	99.5% > عندما $d > 10\mu m$ 90.5% > عندما $d < 10\mu m$	$mg/m^3 > 30$
المصفاة النسيجية	99.5% > لأنعم حبيبات من الغبار	$mg/m^3 20 - 10$
الساحبات المورانية (السيكلون)	99% > للغبار الخشن ($d > 20\mu m$) 40% > للغبار الخشن ($d < 5\mu m$)	$mg / m 150$ عندما $d > 20\mu m$

مقارنة درجات السحب (التصفية)

يبين الجدول (3.6) درجات التصفية لمختلف طرائق التصفية والأجهزة المستعملة لذلك.

3.6 سحب الكبريت (desulpherization)

تشكل SO_2

يتفاوت تشكل ثاني أكسيد الكبريت في معدلات الاحتراق تبعاً لنوع المنشأة وطريقة الاحتراق ونوع الوقود المستخدم. ينطلق SO_2 بشكل رئيسي من أجهزة حرق الفحم والوقود السائل. في حراقات الوقود السائل والغازي ينبعث عملياً كل الكبريت المحمول مع الوقود، بينما يرتبط جزء من الكبريت بالرماد عند إحراق الفحم.

لتخفيض انبعاث SO_2 من محطات الطاقة التي تحرق الوقود المستحاثي (الأحفوري) يتم اللجوء إلى استخدام أنواع من الوقود قليلة المحتوى من الكبريت، أو إلى سحب الكبريت من الوقود قبل حرقه، أو إلى سحب الكبريت من الغازات الناتجة عن الاحتراق. يمكن بمعالجة ميكانيكية مناسبة للفحم سحب الكبريت المرتبط في البيريت (FeS) جزئياً فقط (5 إلى 30 %) من الفحم، أي أن محتوى الفحم من الكبريت ينخفض من 1.3 إلى 1 %.

طرائق سحب الكبريت من غازات الاحتراق ونواتجها النهائية

في جميع طرائق سحب الكبريت من غازات الاحتراق لمحطات الطاقة يتم امتصاص (absorption) أو امتزاز (adsorption) ثاني أكسيد الكبريت الموجود في غازات الاحتراق بمساعدة مواد كيميائية فعالة. وفي أكثر الأحيان يجري سحب الكبريت من غازات الاحتراق عن طريق تحويل كيميائي لبـ SO_2 بمساعدة مادة ماصة لتشكيل الكبريتات أو الكبريتيت. من وسائط الامتصاص هناك $CaCO_3$ (الحجر الكلسي) و CaO (الحجر الكلسي المحروق) و $Ca(OH)_2$ (الكلس المطفأ) بالإضافة إلى مواد أخرى مثل NH_3 و Na_2SO_3 أو $NaOH$. ويُميز بين الطريقة الرطبة (Absorption) ونصف الرطبة والجافة.

أما النواتج فهي تختلف بحسب وسيط الامتصاص، فهناك الجص، عنصر الكبريت، ثاني أكسيد الكبريت السائل، حمض الكبريت، كبريتات الأمونيوم، كبريتيت الكالسيوم. وفي أغلب الأحيان يستخدم الحجر الكلسي في طريقة غسيل غازات الاحتراق، ويكون الناتج النهائي هو الجص

(الجبس) $(CaSO_4 \cdot H_2O)$. يتم تحويل SO_2 إلى جص بنسبة 96 إلى 99 % في المرحلة المائية كفاعل تأين عند قيمة مثلى لـ pH.

في طريقة الامتزاز ينتج من غازات الاحتراق المحملة بالكبريت ومساعدة وسيط الامتزاز (الذي هو غالباً الفحم المنشط) عنصر الكبريت، ثاني أكسيد الكبريت السائل، أو حموض الكبريت، تتجدد قابلية وسيط الامتزاز (الفحم المنشط) عند درجة الحرارة 300 إلى 600 °C.

درجة سحب الكبريت

تنتج درجة سحب الكبريت في منشأة سحب الكبريت من غازات الاحتراق من العلاقة التالية:

$$\eta_{SO_2} = (1 - c_{Cl} / c_{Ra}) 100 \% \quad (5.6)$$

حيث: c_{Ra} أو c_{Cl} تركيز SO_2 في الغاز الخام والغاز النظيف حسب الحال أي عند مدخل ومخرج محطة المعالجة $[mg/m^3]$.

في أجهزة الإحراق الكبيرة ذات الغسيل بالطريقة الرطبة لسحب الكبريت من غازات الاحتراق تزيد درجة السحب عن 90 %.

1.3.6 سحب الكبريت من غازات الاحتراق مع إنتاج الجص

طريقة غسيل غازات الاحتراق بالحجر الكلسي

في طريقة غسل الغازات هذه مع إنتاج الجص يُمرّر الغاز بعد تنقيته في المصفاة الكهربائية عبر غسّالة تكون على شكل برج غسيل بالرداذ. عند إجراء التفاعل في مرحلة واحدة يدور ماء الغسيل ماراً عبر منطقة الامتصاص في دورة، كما يتم سوق الهواء.

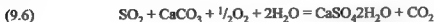
يبن الشكل (6.6) بشكل تخطيطي منشأة سحب الكبريت من غازات الاحتراق لمحطة طاقة تحرق الفحم في Lippendorf في ألمانيا. الأرقام المبينة على الشكل توافق استطاعة قدرها MW 750. تُمرّر غازات الاحتراق قبل وصولها إلى المدخنة على مسخن أولي للغاز من النوع Ljungström فتسخن من الدرجة 55 إلى 110°C.

تحدث في هذه التفاعلات التالية وينتج الجص:



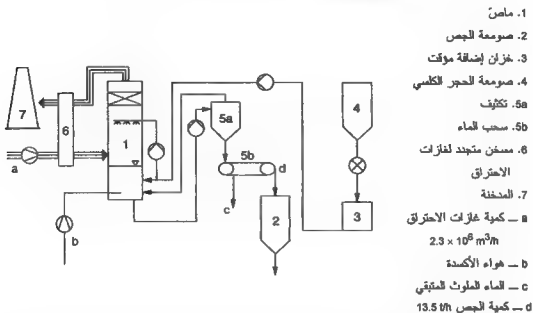


و مجموع التفاعلات السابقة هو:



والموازنة المولية لهذا التفاعل هي:

$$64 + 100 + 16 + 36 = 172 + 44 \quad [\text{kg/kmol}]$$



الشكل 6.6 : منشأة لسحب الكبريت من غازات الاحتراق وإنتاج الجص. محطة توليد الطاقة بالفحم Lippendorf استطاعة وحدة التوليد MW 750 كمية الفحم 220 t/h مقدار الانبعاث 400 mg/m³ محتوى الفحم من الكبريت 1.3 % وزناً.

كمية الحجر الكلسي والجص

يمكن حساب كمية الحجر الكلسي اللازمة CaCO₃ وكمية الجص بالطريقة التالية:

عند إحراق وقود محتواه من الكبريت S (kg/kg) يتشكل S 2 kg من SO₂ لكل kg وقود. ويلزم لكل kg واحد من SO₂ في غازات الاحتراق 100/64 kg من CaCO₃. إذا عُلم استهلاك الوقود m_F ومحتواه من الكبريت S تنتج كتلة CaCO₃ اللازمة من أجل درجة معينة معطاة لسحب الكبريت η_{desO₂}.

$$(10.6) \quad m_{\text{CaCO}_3} = 100 / 64 \times 2 \times S / 100 m_F \eta_{\text{desO}_2}$$

عند استخدام مستحلب الكلس Ca(OH)₂ يحدث تفاعل سحب الكبريت التالي:



$$2 \times 64 + 2 \times 74 + 2 \times 18 + 32 = 2 \times 172$$

من 1 kg SO₂ يتشكل 172/64 kg CaSO₄·2H₂O (الجص).

ومن 56 kg CaO (الحجر الكلسي المحروق) وبعد حلّه في 18 kg ماء (H₂O) يتشكل 74 kg مستحلب كلسي Ca(OH)₂. هذا يعني أنه من 1 kg كلس محروق يتشكل 74/56 kg مستحلب كلسي، وبالتالي فإنه يلزم لكل kg واحد SO₂ مقدار 74/64 kg من Ca(OH)₂ أو 56/64 kg من CaO.

2.6 مثال

في منشأة لسحب الكبريت من غازات الاحتراق في محطة طاقة تبلغ قيمة تدفق غازات الاحتراق $V_G = 175 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ محتوى الغازات من SO₂ قبل مرورها في المنشأة $C_m = 10000 \text{ mg/m}^3$ وبعد المغادرة تصبح $C_{CL} = 400 \text{ mg/m}^3$. ما هو الاستهلاك الساعي للكلس المحروق (CaO) والإنتاج الساعي للجص؟

الحل

1. كمية SO₂ في الساعة الواجب سحبها في المتص من غازات الاحتراق تبلغ:

$$m_{\text{SO}_2} = V_G (c_m - c_{\text{CL}})$$

$$= 1.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h} (10000 - 400) \text{ mg/m}^3 = 16800 \text{ kg/h}$$

2. الاستهلاك الساعي للكلس المحروق:

$$m_{\text{CaO}} = 56 / 64 \times 16800 \text{ kg/h}$$

$$= 14.7 \text{ t/h}$$

3. الإنتاج الساعي للجص:

$$m_{\text{Gypsum}} = 172 / 64 m_{\text{SO}_2} = 172 / 64 \times 16800 \text{ kg/h}$$

$$= 45.15 \text{ t/h}$$

2.3.6 سحب الكبريت من غازات الاحتراق مع إنتاج الكبريت

هناك الطريقة الرطبة التي يكون وسيط الامتصاص فيها NaOH، وطريقة الامتزاز حيث يستخدم الفحم المنشط، ويتج في المحصلة عنصر الكبريت، وثاني أكسيد الكبريت السائل وحمض

الكبريت. يمكن على سبيل المثال ذكر الطريقة الرطبة Wellman - Lord، التي يجري فيها امتصاص SO_2 عن طريق (Na_2SO_3) الذي تلامسه غازات الاحتراق عند أرضية الجهاز التي يرسل منها محلول وسيط الامتصاص على شكل قطرات باتجاه حركتها معاكس لاتجاه حركة غازات الاحتراق. يرتبط SO_2 بمحلول (Na_2SO_3) كيميائياً ويتشكل (NaHSO_3) . أما تجديد وسيط الامتصاص فيتم عن طريق تمرير البخار فيه في منشأة خاصة. عندئذ ينطلق SO_2 مع بخار الماء، ثم تتم معالجته بحيث يخرج على شكل غاز، تبقى Na_2SO_3 الذي يستخدم بعد تجهيزه لسحب الكبريت ثانية من غازات الاحتراق. يجري تميع غاز SO_2 الناتج حتى يمكن استخدامه في الأغراض الصناعية (مثلاً لإنتاج المنظفات، الورق، السكر) أما الرماد المتطاير الذي هو مزيج من كبريتات الشادر $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ فتم معالجته لإنتاج السماد الآزوتي.

الجدول 4.6: مواصفات منشأة سحب الكبريت (طريقة Wellman-Lord) لمحطة Buschhaus. الاستطاعة الكهربائية MW 350، الوقود: فحم بني قيمته الحرارية الدنيا $\text{LCV} = 8 - 12 \text{ MJ/kg}$ ، محتواه من الفحم 3.5 % - 2.

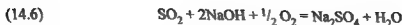
الوصف	القيم
تركيز SO_2 [mg/m^3]	
قبل مرور الغاز على صاحب الكبريت (غاز خام)	10 000-20 000
بعد مروره على صاحب الكبريت (غاز نظيف)	< 40
كمية SO_2 [t/a] (طن بالسنة)	
قبل مرور الغاز على صاحب الكبريت (غاز خام)	180 000
بعد مروره على صاحب الكبريت (غاز نظيف)	6 000
استهلاك محلول كربونات الصوديوم الطبيعية مع 50 % NaOH [t/a]	10 000
النواتج الثانوية لسحب الكبريت من غازات الاحتراق	
الكبريت S	80 000
كبريتات الصوديوم Na_2SO_4	10 000

* عند الشروط العادية، لغازات الاحتراق الجافة، O_2 66 %.

يعطي الجدول (4.6) مواصفات منشأة سحب الكبريت من محطة توليد الطاقة في Buschhaus (في ألمانيا).

معادلات التفاعل هي:

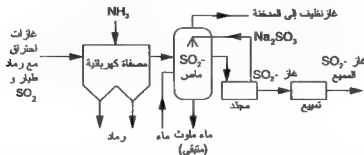




أما تحويل كبريتات الصوديوم إلى حمض فيجري وفق المعادلة التالية:



يبين الشكل (7.6) مخطط منشأة لسحب الكبريت تنتج أيضاً غاز SO_2 المميع.



الشكل 7.6 : مخطط منشأة لسحب الكبريت تنتج غاز SO_2 المميع. محتوى الرماد الطيار الناتج عن الاحتراق 150 mg/m^3 ، الغاز النظيف حوالي $0 - 10 \text{ mg/m}^3$ ، محتوى غازات الاحتراق من SO_2 حوالي 3500 mg/m^3 وفي الغاز النظيف حوالي 300 إلى 350 mg/m^3 . يستخدم غاز SO_2 المميع في:

- صناعة المنظفات
- صناعة الورق
- صناعة المواد الغذائية

4.6 سحب النيتروجين (الآزوت) denitrification (DENOX)

تفانة تقليل أكاسيد النتروجين NO_x

يتعلق انبعاث NO_x عند الاحتراق بمحتوى الوقود من النتروجين وبطريقة الاحتراق. يؤدي استخدام الوقود ذي المحتوى العالي من النتروجين إلى انبعاث عالي لـ NO_x ، كما يزداد انبعاث أكاسيد الآزوت NO_x مع ارتفاع درجة حرارة حجرة الاحتراق وارتفاع درجة حرارة مسخن الهواء الأولي، وكذلك مع زيادة عامل فائض الهواء.

يمكن التمييز بين الإجراءات الأولية والثانوية لتقليل انبعاث NO_x ، إذ تقوم الإجراءات الأولية على اختيار نوع الوقود (تُفضل الأنواع قليلة النتروجين) وعلى كيفية إحراقه. الإجراءات المرتبطة بطريقة إحراق الوقود تتضمن الإحراق على مراحل واسترجاع غازات الاحتراق. يقصد بالإحراق على مراحل إرسال كل من الهواء والوقود إلى الحرق تدريجياً (على مراحل)، ويؤدي هذا إلى تقليل

انبعاث NO_x محدود 10 إلى 20 %، هنا ويجب استخدام الاحتراق على مراحل واسترجاع غازات الاحتراق في نفس الوقت.

شروط ذلك هي إنقاص عامل زيادة الهواء وتخفيض مقدار التسخين الأولي للهواء وإقلال إجهاد حجرة الاحتراق.

يمكن معرفة مردود إجراءات طريقة الإحراق على إنقاص انبعاث NO_x من الجدول (5.6). أما مدلول رموز تقانات إقلال انبعاث NO_x المستخدمة والمذكورة في الجدول فهي كما يلي: (1) استخدام الحراقات ذات الانبعاث القليل لـ NO_x ، (2) استخدام الإحراق على مراحل، (3) استخدام عملية استرجاع غازات الاحتراق.

الجدول 5.6: مردود الإجراءات المستخدمة في عملية الإحراق لتخفيض انبعاث NO_x .

انبعاث NO_x [mg/m ³]	الإجراءات الأولية	الوقود/طريقة الإحراق
800 – 600	1	مسحوق الفحم
400 – 200	3 + 2 + 1	الإحراق بالطريقة الجافة
1800 – 1300	1	مسحوق الفحم
1000 – 400	3 + 2 + 1	التخلص من الرماد بالطريقة المائية
600 – 300		فرشة الوقود الدوامة المستقرة
250 – 100		فرشة الوقود الدوامة الدوارة
600 – 400	3	إحراق الوقود السائل
200 – 100	3 + 2 + 1	
400 – 300	3	إحراق الوقود الغازي
100 – 50	3 + 2 + 1	

آلية تشكل أكاسيد النتروجين (الآزوت)

ينشأ عند احتراق الوقود المستحاثي NO و NO_2 من النتروجين الموجود في هواء الاحتراق والنتروجين المرتبط بالوقود، ويُشار إلى مجموع NO و NO_2 بـ NO_x . يمكن التمييز بين ثلاث آليات لنشوء NO :

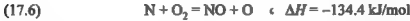
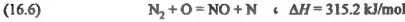
— NO الحراري

— NO الآلي (Prompt)

— NO الذي مصدره الوقود

أوكسيد الآزوت NO الحواري

ينشأ بفعل الأكسدة الجزئية لجزئيات التروجين الموجودة في هواء الاحتراق عند بقائها لفترة طويلة في حيز تفوق درجة حرارته 1300 °C، وذلك وفقاً للمعادلات التالية (بحسب Zeldovich مع انتالي التفاعل ΔH):



يزداد تشكل NO الحواري مع ارتفاع درجة الحرارة بشكل أسي ويتناسب مع تركيز الأوكسجين في منطقة الاحتراق.

أوكسيد الآزوت NO الآني

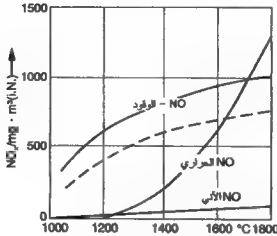
يكون نشوء NO الآني في الشعلة (بحسب Fenimore) قليل الأهمية. تتأكسد روابط نيتروجين الوقود بعد اختزالها إلى روابط سيانيد (H_2C_2N) أو إلى NH_3 لتشكيل NO. ينشأ NO- الوقود نتيجة تأكسد جزئي للنيتروجين المرتبط بشكل عفوي في الوقود، وهو ينطلق حتى عند درجات الحرارة المعتدلة أثناء تفكك الوقود الحواري (Pyrolysis) ثم يتحول إلى NO_x و N_2 . تساهم هذه الآلية عند إحراق مسحوق الفحم بتشكيل 50 إلى 70 % من NO- الوقود. من أجل فحم حجري محتواه من الآزوت 1.2 % فإن 75 % من NO_x المتشكل سببه نيتروجين الوقود، وعند إحراق هذا الوقود وتصريف رماده بالحالة الجافة وباستخدام حراقات قليلة الإصدار لـ NO_x تكون كمية NO_x في غازات الاحتراق 800 mg/m^3 .

أوكسيد الآزوت NO الذي مصدره الوقود

يتأثر تشكل NO- الوقود بالمقادير التالية:

- محتوى الوقود من الآزوت (بسبب المحتوى من N، يسيطر تشكل الـ NO الحواري في النفط والغاز الطبيعي).
- محتوى الوقود من المركبات الطيارة مثل HCN، NH_3 ... إلخ.
- التركيز المرتفع للأوكسجين في بعض مناطق حجرة الاحتراق.
- مدى تناقص (اختزال) NO بفعل الكوك المتبقي والأمس (Radicals).

عند إحراق الفحم الحجري وتصريف الخبث بالحالة المائعة تكون درجة حرارة الاحتراق 1450 إلى 1800 °C، ويكون قسم كبير من الـ NO حرارياً (40 حتى 60 %). وإذا كان التخلص من الخبث بالحالة الجافة فإن درجة حرارة الاحتراق أدنى بـ 100 إلى 300 K ويكون NO الحراري المتشكل فقط 10 إلى 30 % من الكمية الإجمالية. يبين الشكل (8.6) تأثير درجة حرارة حجرة الاحتراق (من 1000 إلى 2000 °C) على تشكل NO.



الشكل 8.6 : تأثير درجة حرارة حجرة الاحتراق على عملية تشكل NO.

بما أن التوازن الترموديناميكي للتفاعل:



يقع عند درجات حرارة تزيد على 650 °C على الجانب الأيسر من المعادلة السابقة، فإنه ينبعث في معظم عمليات الاحتراق NO (فوق الـ 95 %). وعند درجات حرارة أقل من 650 °C (كذلك عند الضغط الجوي) يتم تحول NO إلى NO₂، وهذا يتعلق بنسبة وجود O₂ في غازات الاحتراق وفترة بقائهما معاً.

تبلغ نسبة NO في NO_x الإجمالي الذي تطلقه حراقات عظمات الطاقة 95 % أما NO₂ تبلغ نسبته 5 % فقط.

1.4.6 منشأة سحب الآزوت (DENOX) من غازات الاحتراق

يتم تحرير غازات الاحتراق بواسطة الإجراءات الثانوية من SO₂ بشكل شبه كامل. ولسحب NO_x هناك منشآت خاصة يستخدم منها نوعان SNCR و SCR.

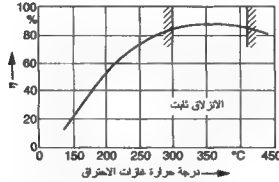
درجة سحب الآزوت

تنتج درجة سحب الآزوت من المعادلة:

$$\eta_{\text{DENOX}} = (1 - c_{\text{CL}} / c_{\text{Ra}}) 100 \% \quad (19.6)$$

حيث: c_{CL} و c_{Ra} تركيز NO_x في الغاز الخام والنظيف حسب الحال، أي عند مدخل منشأة سحب الآزوت ومخرجها $[\text{mg}/\text{m}^3]$.

يبين الشكل (9.6) درجة سحب الآزوت بالنسبة لدرجة حرارة غازات الاحتراق. درجة الحرارة المثلى تقع بين 300 و 400 °C.



الشكل 9.6 : درجة سحب الآزوت وارتباطها بدرجة حرارة غازات الاحتراق.

طرائق التوضع

يتم تركيب معدات سحب أكاسيد النتروجين في محطات الطاقة في واحد من ثلاثة مواقع حسب الحال:

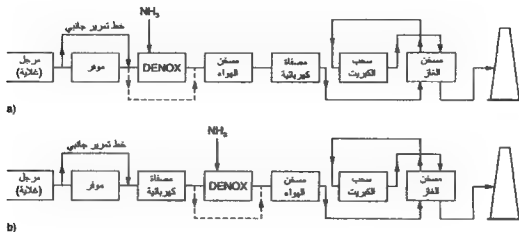
— سحب الآزوت من الغازات الساخنة والمحملة بالغبار (High-dust).

— سحب الآزوت من الغازات الساخنة غير المحملة بالغبار (Low-dust).

— سحب الآزوت من الغازات الباردة.

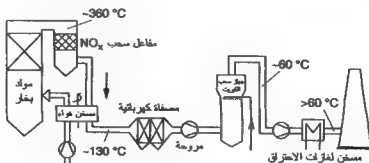
في المنشآت التي تتعامل مع غاز ساخن محمل بالغبار توضع معدات سحب الآزوت من الغازات بعد سطح التسخين الرئيسي لمولد البخار مباشرة بين الموفر (ECO) ومسخن الهواء. يمر قسم من الغازات الساخنة المحملة بالغبار على الموفر للمحافظة على درجة حرارة التشغيل اللازمة لعمل الحفّاز (Catalytic Converter) وهي تقع بين 300 و 400 °C. ويستمر الحفّاز صالحاً للاستخدام

لمدة 12 000 ساعة عمل. يُركب خلف جهاز سحب الآزوت كل من مسخن الهواء و فاصل الغبار (المصفاة الكهربائية) ومعدات سحب الكبريت والمسخن الأولي للتحديد لغازات الاحتراق.



الشكل 10.6: توضّع منشأة سحب أكاسيد الآزوت DENOX (a) قبل مسخن الهواء والمصفاة الكهربائية ومعدات سحب الكبريت (b) خلف للمصفاة الكهربائية وقبل مسخن الهواء ومعدات سحب الكبريت. في النوع الثاني الذي يعالج غازات الاحتراق الساخنة ذات المحتوى القليل من الغبار (الشكل 10.6b) يركب جهاز سحب الآزوت بعد فاصل الغبار (المصفاة الكهربائية)، يلي صاحب NO_x مسخن الهواء الأولي وجهاز سحب الكبريت ثم مسخن غازات الاحتراق. أما في النوع الثالث الذي يعالج غازات الاحتراق الباردة غير المحملة بالغبار فيركب جهاز سحب الآزوت بعد جهاز سحب الكبريت، وقبل ذلك تسخّن غازات الاحتراق في المسخن إلى درجة الحرارة $300^\circ C$.

يبين الشكل (11.6) مخطط المنشأة التي يركب فيها جهاز سحب أكاسيد الآزوت قبل مسخن الهواء الأولي بشكل مبسط.



الشكل 11.6: مخطط وصل مولد البخار مع جهاز سحب أكاسيد الآزوت قبل مسخن الهواء الأولي.

طريقة SCR لسحب أكاسيد الآزوت من غازات الاحتراق (Selective Catalytic Reduction)
تقلل طريقة التخفيض الانتقائي لأكاسيد الآزوت في غازات الاحتراق بواسطة الحفاز (مُعجِّل التفاعل) انبعاث أو أكسيد الآزوت عن طريق تفاعل محفز غير متجانس لأوكسيد الآزوت مع وسيط (يكون عادة الأمونياك NH_3) عند درجات حرارة تتراوح بين 300 و 400 °C، وبهذا يتحول NO إلى آزوت وماء. يتألف الحفاز من مادة أساسية (TiO_2 , Al_2O_3 أو السيليكات) مطلية بروابط من الفاناديوم، الموليبيدوم، التيتانيوم، التنغستن. يأخذ الحفاز شكل أنابيب أو صفائح أو أطباق (صينية). إذا كانت غازات الاحتراق محملة بشكل قليل بالغبار، فإنها تُمرر على الحفاز بشكل أفقي (أو شاقولي إذا كانت عالية المحتوى من الغبار).

التفاعل الرئيسي الذي يؤدي إلى تخفيض NO بطريقة SCR هو:



الكتلة المولية لـ NO هي (30 kg/kmol) ولـ NH_3 هي (17 kg/kmol)، فإذا كان التدفق الحجمي لغازات الاحتراق V_G [m³/h] وأردنا تخفيض تركيز NO_x في غازات الاحتراق من c_{Ra} إلى c_{CL} [mg/m³] فإن كمية NH_3 اللازمة تكون:

$$(21.6) \quad m_{\text{NH}_3} = 17 / 30 V_G (c_{Ra} - c_{CL}) 10^{-6} \quad [\text{kg/h}]$$

3.6 مثال

ما هي كمية NH_3 اللازمة لسحب الآزوت من غازات الاحتراق إذا كان $V_G = 1.75 \times 10^6$ m³/h باستخدام طريقة SCR وكان تركيز NO_x في الغاز الخام $c_{Ra} = 750$ mg/m³ وفي الغاز النظيف $c_{CL} = 150$ mg/m³؟ المحرم معطاة عند الشروط النظامية.

الحل

الاستهلاك الساعي لـ NH_3 :

$$\begin{aligned} m_{\text{NH}_3} &= 17 / 30 \cdot 1.75 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h} (750 - 150) \text{ mg/m}^3 \\ &= 595 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

تتعلق درجة سحب أكاسيد الآزوت في طريقة SCR بفعالية سطح الحفاز وبزمن تلامس غازات الاحتراق مع الحفاز، ويمكن الوصول إلى درجة تنقية 95 %.

من أجل تشغيل آمن يجب ألا يتجاوز تركيز NH_3 المتبقي في غازات الاحتراق عند مغادرة جهاز سحب NO_x القيمة 5 ppm، وإلا يمكن أن تنشأ ترسبات وإشكالات في مسخن الهواء الأولي والمصفاة الكهربائية وجهاز سحب الكبريت. عند إغلاق مولد البخار تغاد غازات الاحتراق الباردة عبر مجرى جانبي (Bypass) حول مفاعل الـ SCR.

لا تطراً عملياً أية إشكالات عندما يوصل مفاعل الـ SCR بعد جهاز سحب الكبريت بشرط ضمان خلو غازات الاحتراق بعد جهاز سحب الكبريت من HCl و HF وتسخين الغازات قبل وصولها إلى جهاز سحب الآزوت DENOX إلى درجة الحرارة 300 وحتى 400°C .

طريقة SNCR لسحب الآزوت من غازات الاحتراق (Selective Non-Catalytic Reduction)
تقلل طريقة التخميض الانتقائي لأكاسيد الآزوت في غازات الاحتراق بدون حفاز (بعكس طريقة SCR) من انبعاث NO_x وذلك عن طريق التفاعل بين غازات الاحتراق ووسيط إنقاص الآزوت عند درجات الحرارة 800 حتى 1000°C ، ويستخدم عادة الأمونياك NH_3 كوسيط. يمكن أن تصل درجة سحب الآزوت بهذه الطريقة حتى $\eta_{\text{DENOX}} = 80\%$.

5.6 السحب المتزامن للكبريت والآزوت

يمكن تنظيف غازات الاحتراق بالسحب المتزامن (بنفس الوقت) لـ NO_x و SO_2 في نفس المنشأة. وهناك طرائق رطبة وأخرى جافة لهذا الغرض.

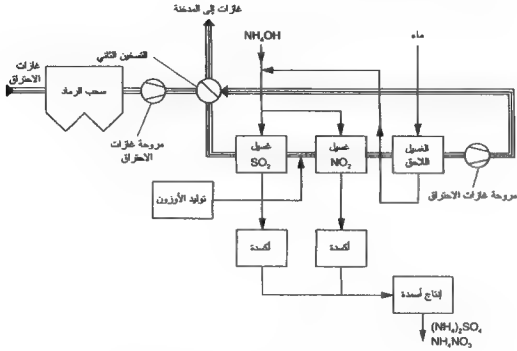
طريقة الفحم (الكربون) المنشط

في طريقة الامتزاز الجاف بالفحم المنشط يؤكسد في المرحلة الأولى SO_2 إلى حمض الكبريت H_2SO_4 ، وذلك عند درجة الحرارة 120°C ، ويتم ذلك بمساعدة الكربون المنشط. وفي المرحلة الثانية يضاف NH_3 وفحم منشط ومُحدد C وبذلك يُحفَّز NO_x ليتحول إلى N_2 و H_2O . يتم تخليص الفحم للمنشط بشكل دوري من H_2SO_4 أي أنه يُحدد.

الطريقة الرطبة

يستخدم في الطريقة الرطبة NH_4OH من SO_2 يتشكل في البداية $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$ و NH_4HSO_3 التي تُؤكسد بعدئذ إلى NH_4NO_2 و NH_4NO_3 . بمساعدة الآزوت تسحب في الغاسل الثاني أكاسيد الآزوت على شكل نترات أو نيتريت الأمونيوم من غازات الاحتراق الخالية من SO_2 ، ثم يتم

بعدئذ التخلص من الآثار للتبقية من المواد المضافة. الشكل (12.6) يبين مخطط منشأة السحب المتزامن للكبريت والأزوت من غازات الاحتراق.



الشكل 12.6 : مخطط منشأة السحب المتزامن للكبريت والأزوت من غازات الاحتراق.

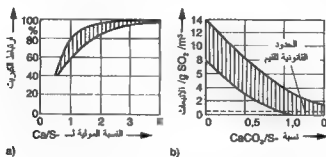
تقليل انبعاث SO_2 و NO_x في مولدات البخار ذات فرشاة الوقود الدوامة

بإضافة الحجر الكلسي وجراء انخفاض درجة الحرارة في حجرة احتراق مولد البخار ذي فرشاة الوقود الدوامة يتم التخلص من الكبريت بنسبة 97 % وينخفض تشكل NO بمعدل 50 %. تتعلق عملية سحب الكبريت بالنسبة Ca/S (الشكل 13.6). يتم إنشاء محطات الطاقة ذات فرشاة الوقود الدوامة في ألمانيا واليابان وفرنسا والسويد وأمريكا (USA). وقد تم إنشاء أكبر محطة طاقة في العالم بمولد بخار ذي فرشاة وقود دوارة باستطاعة كهربائية قدرها 250 MW وذلك في جنوب فرنسا (Provence) وبدأت بالعمل عام 1996.

طريقة شعاع الإلكترونات

يجري تطوير هذه الطريقة في الوقت الحاضر، ويتم فيها تبريد غازات الاحتراق المنقاة من الغبار حتى درجة الحرارة 70 إلى 90 °C، ثم تُمرّر على NH_3 ، وبعدها تساق إلى مفاعل تحاط فيه الغازات

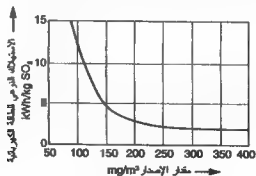
بشعاع من الإلكترونات المنطلقة من مُسرّع (معجل) (accelerator) ذي نبضات. يقوم مولد شعاع (تيار) الإلكترونات بإنتاج نبضات توترها (جهدها) الأعظمي 500 kv و تيار هالتها (كورونا) 36 mA، وبذلك يتم تفكيك جزئيات O_2 و N_2 إلى ذرات. تتحول أكاسيد الآزوت والكبريت (NO_x و SO_x) أولاً مع ذرات الأوكسجين إلى حموض الكبريت والآزوت (H_2SO_4 و HNO_3) ثم تتحول مع NH_3 إلى NH_4NO_3 و $(NH_4)_2SO_4$. وهذه تتم تصفيتها من غازات الاحتراق عن طريق مصافي نسيجية (ذات ألياف) وتحقق هذه الطريقة درجة عالية لسحب الآزوت والكبريت، وقد أمكن في منشأة تجريبية الوصول إلى سحب لـ NO_x قدره 85 % ولـ SO_x قدره 98 % من غازات الاحتراق.



الشكل 13.6 : درجة سحب الكبريت في فرشاة الوقود النواعية (a) ارتباط الكبريت بالنسبة المولية Ca/S (b) الانبعاث النوعي للكبريت وعلاقته بالنسبة $CaCO_3/S$.

الاستهلاك الذاتي للطاقة

يبين الشكل (14.6) الاستهلاك النوعي للكهرباء وعلاقته بمقدار انبعاث SO_2 . على سبيل المثال، عند تخفيض تركيز SO_2 المسموح به في غازات الاحتراق من 200 mg/m^3 إلى 100 mg/m^3 يزداد الاستهلاك الذاتي النوعي للطاقة من 2.5 kWh/kg إلى 12.5 kWh/kg .



الشكل 14.6 : الاستهلاك النوعي للكهرباء وعلاقته بمقدار انبعاث SO_2 .

7 محطات العنفات الغازية

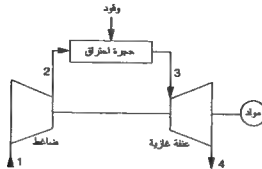
إن أهم اعتبارات هندسة الطاقة المتقدمة هي: المردود المرتفع وتوليد الكهرباء مع المحافظة على سلامة البيئة وتكاليف الطاقة المنخفضة. إن المحطات الحديثة التي تعمل على استخدام العنفات الغازية وبشكل خاص محطات الدارة المركبة التي تستخدم العنفات الغازية والبخارية معاً، والمبنية على أساس المردود العالي للعنفات الغازية. هذه المحطات تحقق الاعتبارات المذكورة أعلاه بأفضل ما يمكن، إذا ما قورنت بمحطات توليد الطاقة التقليدية. فمثلاً يصل مردود أفضل النماذج من العنفات الغازية إلى 40 %، وتبلغ تكاليف المنشأة 50 % من تكاليف منشأة بخارية مقابلة لها، ويقى تأثيرها على البيئة منخفضاً جداً. ومع الدارة البخارية التالية الموصلة بما يصل المردود الإجمالي للدارة المركبة إلى ما يزيد عن 57 %.

سُتعالج في هذا الفصل النواحي الترموديناميكية، والبيئية المرتبطة بمحطة توليد الطاقة بالإضافة إلى الجوانب الفنية والاقتصادية لمحطات العنفات الغازية الحديثة. أما محطات الدارة المركبة فستعالج في الفصل الثامن.

1.7 دورة عمل جول

سنبدأ قبل كل شيء بالتحليل الترموديناميكي لمنشأة العنف الغازية البسيطة. هناك نوعان من هذه المنشآت: المفتوحة والمغلقة. تتألف منشأة العنف الغازية المفتوحة من العناصر التالية: ضاغط (Compressor)، حجرة احتراق، عنفة غازية مع مولد كهربائي كما هو مبين في الشكل (1.7). تبين دورة عمل جول الأسس الترموديناميكية لمنشأة ذات عنفة غازية، إذا أُجريت هذه الدورة على غاز مثالي وبشكل عكوس. يقصد بمفهوم العكوسية عند إجراء الدورة أن تغيرات الحالة للغاز تتم بدون ضياعات داخلية للطاقة وبدون احتكاك، وبأن إضافة الحرارة أو طرحها يجري عند فروق

درجات حرارة صغيرة يمكن إهمالها، وباعتبار وسيط العمل المستعمل في الدورة غازاً كاملاً (مثالياً).



الشكل 1.7 : مخطط عمل منشأة ذات عنفة غازية مفتوحة.

يبين الشكل (2.7) دورة عمل جول في مخططي $p-v$ و $T-s$. تكتمل دورة عمل جول من خلال تحولات الحالة العكوسة التالية:

- 1 - 2 انضغاط ايزنتروبي للهواء في الضاغط.
- 2 - 3 إضافة الحرارة في حجرة الاحتراق (الاحتراق) بثبوت الضغط.
- 3 - 4 تمدد ايزنتروبي لوسيط العمل في العنفة الغازية .
- 4 - 1 طرح للحرارة إلى الوسيط المحيط بثبوت الضغط.

من المهم في عملية التحليل الترموديناميكي لمخطة العنفة الغازية تحديد المردود الحراري لعملية تحول الحرارة إلى عمل. ومن أجل ذلك نحتاج كمية الحرارة المقلّمة والعمل المفيد لدورة العمل. تتحدد هذه الكميات عن طريق معرفة درجات حرارة الغاز عند المواقع المختلفة. يجري التحليل الترموديناميكي بافتراض أن مواصفات وسيط العمل (غازات الاحتراق) ماثلة لمواصفات الغاز المثالي الذي هو الهواء. فمثلاً تحسب كميات الحرارة عن طريق السعة الحرارية الوسطية بثبوت الضغط c_p التي قيمتها 1.005 kJ/kg K .

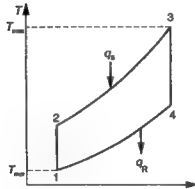
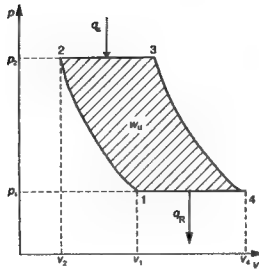
ترتبط المقادير المميزة لحالة الغاز أي الضغط p [Pa] ودرجة الحرارة T [K] والحجم النوعي v [m^3/kg] من خلال معادلة الحالة التالية:

$$(1.7) \quad p v = R T$$

حيث: R ثابت الغاز [J/kg K] (قيمته مثلاً للهواء 287 J/kg K).

وتتحقق من أجل الانضغاط أو التمدد الايزنتروبي العلاقات التالية:

$$(2.7) \quad p v^k = \text{const} \text{ و } T v^{k-1} = \text{const} , \quad T / p^{(k-1)/k} = \text{const}$$



الشكل 2.7 : دورة عمل جول في المخططين p, v و T, s .

العلاقات التالية (3.7 حتى 8.7) تعطي كميات الحرارة النوعية بالنسبة لـ 1 kg من الغاز من أجل دورة عمل جول.

تحتسب الحرارة النوعية المضافة $[\text{kJ/kg}]$ من المعادلة:

$$(3.7) \quad q_s = c_p (T_3 - T_2) = h_3 - h_2$$

أما الحرارة النوعية المطروحة $[\text{kJ/kg}]$:

$$(4.7) \quad q_R = c_p (T_4 - T_1) = h_4 - h_1$$

العمل النوعي للتمدد في العنفة الغازية:

$$(5.7) \quad w_T = h_3 - h_4 = c_p (T_2 - T_1) \quad [\text{kJ/kg}]$$

والعمل النوعي للامتصاص في الضاغط:

$$(6.7) \quad w_{\text{comp}} = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad [\text{kJ/kg}]$$

أما العمل المفيد للدورة عمل حول:

$$(7.7) \quad w_u = w_T - w_{\text{comp}} \quad [\text{kJ/kg}]$$

وفقاً للقانون الأول في الترموديناميك فإن العمل النوعي المفيد مساوٍ للحرارة النوعية المفيدة:

$$(8.7) \quad w_u = q_u = q_s = c_p (T_3 - T_2) - (T_4 - T_1) \quad [\text{kJ/kg}]$$

يُعرف المردود الحراري للدورة عمل بأنه نسبة العمل المفيد للدورة إلى الحرارة المضافة. ومن أجل دورة عمل حول:

$$\eta_{\text{th}} = w_u / q_s = 1 - q_R / q_s \\ = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

$$(9.7) \quad = 1 - T_1 (T_4 / T_1 - 1) / T_2 (T_3 / T_2 - 1)$$

أهم المقادير المميزة للدورة عمل العنفة الغازية هو نسبة الضغط في الضاغط وفي العنفة الغازية:

$$(10.7) \quad \beta = p_2 / p_1$$

ترتبط درجات الحرارة عند النقاط المميزة للدورة عمل حول ببعضها البعض عن طريق نسبة الضغط كما يلي:

$$(11.7) \quad T_2 = T_1 \cdot \beta^{(k-1)/k}$$

$$(12.7) \quad T_4 = T_3 / \beta^{(k-1)/k}$$

حيث: T_1 درجة الحرارة قبل الضاغط T_2 بعد الضاغط

T_3 درجة الحرارة قبل العنفة الغازية و T_4 بعد العنفة الغازية

k أس الايزنتروبي (قيمته 1.4 من أجل الهواء في الضاغط والعنفة الغازية).

من المعادلتين 11.7 و 12.7 ينتج:

$$(13.7) \quad T_2 / T_1 = T_3 / T_4 = \beta^{(k-1)/k}$$

و:

$$(14.7) \quad T_4 / T_1 = T_3 / T_2$$

إذا عوضنا المعادلة (15.7) في المعادلة (9.7) نحصل على المردود الحراري للدورة عمل حول:

(15.7)

$$\eta_{th} = 1 - T_1 / T_2 = 1 - 1 / \beta^{(k-1)/k}$$

تبين المعادلة (15.7) بأن المردود الحراري η_{th} لمنشأة عنفة غازية يزداد بارتفاع نسبة الضغط β . تكون قيمة β محدود إلى 15 في العنفات الغازية الحديثة ذات الاستطاعات العالية، والتي تتمتع بتبريد فعال لشفرات العنف. و تصل قيمة β إلى 30 في أحدث النماذج من العنفات الغازية GT 24 و GT 26 التي تنتجها شركة ABB. أما درجة حرارة الدخول الأعظمية المسموح بها للعنفة الغازية فهي ذات سقف معين يحدده نوع المعدن المستخدم وتقانة التبريد، وتبلغ حالياً حوالي 1250 °C. يُحسب العمل النوعي المفيد لمنشأة عنفة غازية بدلالة كمية الحرارة المضافة والمردود الحراري للمنشأة كما يلي:

$$(16.7) \quad w_u = q_u \eta_{th} \quad [\text{kJ/kg}]$$

سيتم في المثلين 1.7 و 2.7 حساب النقاط المميزة وكميات الحرارة النوعية المضافة والمردود الحراري لدورة عمل جول.

مثال 1.7

عنفة غازية تعمل وفق دورة عمل جول (انظر الشكلين 1.7 و 2.7) وعند نسبة الضغط $\beta = p_2 / p_1 = 15$. مواصفات الهواء قبل الضاغط هي: $p_1 = 1 \text{ bar}$ و $t_1 = 10^\circ \text{C}$. درجة حرارة الدخول إلى العنف $T_3 = 1100^\circ \text{C}$.

الوسط العامل هو غاز مثالي: هواء ثابتته $R = 0.287 \text{ kJ/kg K}$ وأس الايزوتروبي له $k = 1.4$. يطلب تحديد مميزات وسيط العمل (الضغط p ، درجة الحرارة T ، الحجم النوعي v) عند النقاط المميزة للدورة.

الحل

1. الحجم النوعي للهواء قبل الضاغط يمكن حسابه من معادلة الحالة للغاز المثالي:

$$\begin{aligned} v_1 &= R T_1 / p_1 \\ &= 0.287 \text{ kJ/kg K} \times 283 / 100 \text{ kPa} \\ &= 0.812 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

2. درجة حرارة الهواء بعد الانضغاط الايزنتروبي:

$$T_2 = T_1 \beta^{(k-1)/k} \\ = 283 \times 15^{(1.4-1)/1.4} = 613.5 \text{ K}$$

3. درجة حرارة الغاز بعد التمدد الايزنتروبي في العنفة:

$$T_4 = T_3 / \beta^{(k-1)/k} \\ = 1373 / 15^{0.2857} = 633.4 \text{ K}$$

وبطريقة مشابهة تنتج القيم المميزة عند كل النقاط المحددة لدورة العمل. الجدول (1.7) يعطي النتائج لكل نقطة.

الجدول 1.7: القيم المميزة لوسيط العمل عند النقاط المحددة لدورة عمل جول

النقطة	p [bar]	T [K]	ν [m ³ /kg]
1	1	283	0.812
2	15	613.5	0.117
3	15	1373	0.263
4	1	633.4	1.818

مثال 2.7

من أجل المنشأة ذات العنفة الغازية الواردة في المثال 1.7 يطلب تحديد مايلي:

- عمل الانضغاط النوعي
- عمل التمدد النوعي
- العمل المفيد النوعي
- المردود الحراري

إذا تغيرت نسبة الضغط β بين 4 و 30، فكيف يتغير المردود الحراري لدورة العمل؟

قيمة السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لوسيط العمل الذي هو الهواء تبلغ 1.005 kJ/kg K.

الحل

1. وفقاً للجدول (1.7) فإن درجات الحرارة كالتالي ($\beta = 15$): قبل الانضغاط $T_1 = 283 \text{ K}$ ، بعد

الانضغاط $T_2 = 613.5 \text{ K}$ ، قبل التمدد $T_3 = 1373 \text{ K}$ وبعد التمدد $T_4 = 633.4 \text{ K}$.

2. العمل النوعي للانضغاط:

$$w_{\text{comp}} = c_p (T_2 - T_1) \\ = 1.005 \text{ kJ/kg} (613.5 - 283) \text{ K} = 332.2 \text{ kJ/kg}$$

العمل النوعي للتمدد:

$$w_T = c_p (T_3 - T_4) \\ = 1.005 \text{ kJ/kg} (1373 - 633.4) \text{ K} = 743.3 \text{ kJ/kg}$$

العمل النوعي المفيد:

$$w_u = w_T - w_{\text{comp}} \\ = 743.3 \text{ kJ/kg} - 332.2 \text{ kJ/kg} = 411.1 \text{ kJ/kg}$$

3. كمية الحرارة النوعية المضافة للدورة:

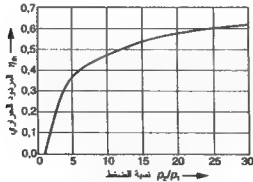
$$q_s = c_p (T_3 - T_2) \\ = 1.005 \text{ kJ/kg} (1373 - 613.5) \text{ K} = 763.3 \text{ kJ/kg}$$

4. المردود الحراري للدورة العمل:

$$\eta_{\text{th}} = w_u / q_s \\ = 411.1 \text{ kJ/kg} / 763.3 \text{ kJ/kg} = 0.538$$

5. قيمة المردود الحراري هذه أكبر بـ $0.237 / (0.538 - 0.327) = 0.538$ من قيمة η_{th} التي تبلغ 0.237 عندما $\beta = 4$.

6. عندما تكون $\beta = 30$ فإن المردود الحراري يصبح 0.621 وهو أكبر من المردود الحالي الذي يبلغ 0.538 بمقدار $0.538 - 0.621 = 0.083$ أي 15.4 %.



الشكل 3.7: المردود الحراري لدورة عمل جول وعلاقته بنسبة الضغط p_2/p_1 .

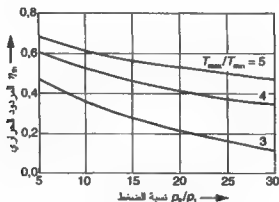
الجدول (2.7) والشكل (3.7) يبينان العلاقة بين المردود الحراري لدورة عمل جول η_{th} ونسبة

$$\beta = p_2/p_1 \text{ الضغط}$$

الجدول 2.7: المردود الحراري η_{th} لدورة عمل جول وعلاقته بنسبة الضغط β .

نسبة الضغط	1	5	10	15	20	30	60
المردود الحراري η_{th} %	0	36.9	48.2	53.5	57.5	65.1	69

يتعلق المردود الحراري لدورة عمل جول بشكل كبير بنسبة درجة الحرارة الأعظمية إلى الأصغرية T_{max}/T_{min} ، حيث T_{max} درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية و T_{min} درجة حرارة الدخول إلى الضاغط. يبين الشكل (4.7) تخطيطاً تأثير نسبة درجة الحرارة الأعظمية إلى الأصغرية T_{max}/T_{min} ونسبة الضغط p_2/p_1 على المردود الحراري لدورة عمل جول.



الشكل 4.7 : المردود الحراري لدورة عمل جول η_{th} وعلاقته بنسبة الضغط p_2/p_1 ونسبة درجات الحرارة T_{max}/T_{min} (3,4,5).

2.7 الكفاءة (الفعالية)

تختلف دورة العمل لمنشأة عنفة غازية فعلية عن دورة عمل جول. تُراعى في المنشأة ذات العنفة الغازية ضياعات الطاقة الناتجة عن عمليتي الانضغاط والتمدد الفعليين (غير العكوسيين) في كل من الضاغط والعنفة، وكذلك ضياعات الضغط عند مدخل الضاغط وفي حجرة الاحتراق وعند مخرج العنفة الغازية.

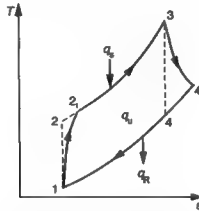
يبين الشكل (5.7) اختلاف تغيرات الحالة الفعلية في الضاغط والعنفة الغازية عن التغيرات الايزونتروبية.

يكون عمل الانضغاط الفعلي أكبر وعمل التمدد الفعلي في العنفة أصغر والعمل للمفيد لدورة العمل الحقيقية أصغر منه في دورة عمل جول وذلك بسبب عدم العكسية. تتم مراعاة هذه الاختلافات عن طريق المردود الداخلي للضاغط $\eta_{i,comp}$ وللنفة الغازية $\eta_{i,T}$ ، أي أن:

$$(17.7) \quad \eta_{i,comp} = w_{comp} / w_{comp,s}$$

$$(18.7) \quad \eta_{i,T} = w_{T,s} / w_T$$

حيث: w_{comp} عمل الانضغاط النوعي النظري و $w_{comp,s}$ عمل الانضغاط النوعي الفعلي [kJ/kg]، $w_{T,s}$ عمل التمدد النوعي الفعلي و w_T عمل التمدد النوعي النظري [kJ/kg].



الشكل 5.7 : الانضغاط والتمدد الفعليان في منشأة العنفة الغازية في المخطط T-s.

يمكن اعتماد القيم التالية للمردود الداخلي من أجل العنفات الغازية والضواغط الحديثة $\eta_{i,T} = 0.9 - 0.92$ و $\eta_{i,comp} = 0.89 - 0.86$.

ينتج الاتالي للهواء بعد انضغاط غير عكوس (فعلي) كما يلي:

$$(19.7) \quad h_{2,s} = h_1 + (h_2 - h_1) / \eta_{i,comp} \quad [\text{kJ/kg}]$$

وبطريقة مشابهة يمكن حساب الاتالي للغاز بعد تمدد غير عكوس في العنفة:

$$(20.7) \quad h_{4,s} = h_3 - (h_3 - h_4) / \eta_{i,T} \quad [\text{kJ/kg}]$$

وتنتج بالتالي درجة الحرارة الفعلية بعد الانضغاط أو التمدد كما يلي:

$$(21.7) \quad T_{2,a} = T_1 + (T_2 - T_1) / \eta_{i,comp} \quad [K]$$

$$(22.7) \quad T_{4,a} = T_3 - (T_3 - T_4) \eta_{i,comp} \quad [K]$$

بحسب عمل الانضغاط النوعي بالنسبة لـ 1 kg وسيط عمل من العلاقة:

$$(23.7) \quad w_{comp,a} = w_{comp} / h_{i,comp} = (h_2 - h_1) / \eta_{i,comp} \\ = h_{2,a} - h_1 = c_p(T_{2,a} - T_1) \quad [kJ/kg]$$

والعمل النوعي الفعلي للتمدد بالنسبة لـ 1 kg وسيط عمل:

$$(24.7) \quad w_{T,a} = \eta_{iT} / w_T = \eta_{iT}(h_3 - h_4) = h_3 - h_{4,a} = c_p(T_3 - T_{4,a}) \quad [kJ/kg]$$

والعمل النوعي الفعلي المفيد بالنسبة لـ 1 kg وسيط عمل:

$$(25.7) \quad w_{u,a} = w_{T,a} / w_{comp,a} = (h_3 - h_{4,a}) - (h_{2,a} - h_1) \\ = c_p[(T_3 - T_{4,a}) - (T_{2,a} - T_1)] \quad [kJ/kg]$$

والاستطاعة النظرية لمنشأة العنفة الغازية:

$$(26.7) \quad P_{theor} = m(w_T - w_{comp}) \quad [KW]$$

وأخيراً فإن الاستطاعة الفعلية لمنشأة العنفة الغازية تحسب من العلاقة التالية:

$$(27.7) \quad P = m w_{u,a} = m(w_{T,a} - w_{u,a}) = m(w_T \eta_{iT} - w_{comp} / \eta_{i,comp}) \quad [KW]$$

حيث: m التدفق الكتلي للغاز في العنفة الغازية [kg/s].

في المثال (3.7) تمت مراعاة تأثير عدم العكسية في الضاغط والعنفة الغازية وكذلك تأثير ضياعات الطاقة على المردود الحراري لمخطة العنفة الغازية .

3.7 مثال

ما هو المردود الحراري لمخطة عنفة غازية نسبة الضغط فيها 15 ودرجة حرارة الدخول إلى الضاغط 10 °C ودرجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية 1100 °C، إذا كان المردود الداخلي للعنفة 0.92 وللضاغط 0.89؟

الحل

1. يؤخذ كل من درجة حرارة وسيط العمل بعد الانضغاط والتمدد الايزنتروبي وكميات الحرارة النظرية النوعية (عمل الانضغاط والتمدد، كمية الحرارة المضافة) وكذلك المردود الحراري لدورة عمل جول العكوسة من المثاليين (1.7) و(2.7): $T_1 = 283 \text{ K}$, $T_2 = 613.5 \text{ K}$, $T_3 = 1373 \text{ K}$, $T_4 = 633.4 \text{ K}$, $w_{comp} = 332.2 \text{ kJ/kg}$, $q_s = 763.3 \text{ kJ/kg}$, $\eta_{th} = 0.538$.

2. بمساعدة المردود الداخلي للنفثة $\eta_{IT} = 0.92$ وللضاغط $\eta_{i,comp} = 0.89$ يمكن حساب درجات الحرارة الفعلية لوسيط العمل بعد الانضغاط والتمدد كما يلي:

$$\begin{aligned} T_{2,a} &= T_1 + (T_2 - T_1) / \eta_{i,comp} \\ &= 283 + (613.5 - 283) / 0.89 = 645.3K \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{4,a} &= T_3 + (T_3 - T_4) / \eta_{IT} \\ &= 1373 - (1373 - 633.4) 0.92 = 692.6K \end{aligned}$$

3. يُحسب العمل النوعي الفعلي للانضغاط، والتمدد، والعمل النوعي المفيد كما يلي:

$$\begin{aligned} w_{comp,a} &= w_{comp} / \eta_{i,comp} \\ &= 332.2 \text{ kJ/kg} / 0.89 = 373.2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{T,a} &= w_T \eta_{IT} \\ &= 743.3 \text{ kJ/kg} \times 0.92 = 683.8 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{u,a} &= w_{T,a} - w_{comp,a} \\ &= 683.8 \text{ kJ/kg} - 373.2 \text{ kJ/kg} = 310.6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

4. الحرارة المضافة لكل 1 kg غاز في حجرة احتراق النفثة الغازية:

$$\begin{aligned} q_{s,a} &= c_p (T_3 - T_{2,a}) \\ &= 1.005 \text{ kJ/kg} (1373 - 654.3)K = 772.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

5. المردود الحراري لدورة العمل الفعلية:

$$\begin{aligned} \eta_{th,a} &= w_{u,a} / q_{s,a} \\ &= 310.6 \text{ kJ/kg} / 772.3 \text{ kJ/kg} = 0.43 \end{aligned}$$

بالمقارنة مع $\eta_{th} = 0.538$ لدورة عمل جول العكوسة (انظر المثال 2.7) فإن المردود الحراري الفعلي $\eta_{th,a}$ أصغر بـ: $20\% = (0.538 - 0.43) / 0.538$

3.7 رفع الاستطاعة الجاهزة

1.3.7 رفع نسبة الضغط ودرجة حرارة الدخول إلى النفثة الغازية

تحدد قدرة منشأة ذات نفثة غازية على تقديم الاستطاعة عن طريق الاستطاعة القابلة للاستخدام (المفيدة) والمردود الحراري والاستهلاك النوعي للحرارة.

أما الاستطاعة الحرارية المفيدة p لمحطة عنفة غازية فتحدد عن طريق تدفق الغاز الذي يمر عبر العنفة الغازية والعمل النوعي المفيد للعنفة:

$$(28.7) \quad P = m W_u \quad [\text{Kw}]$$

يتألف التدفق الكتلي للغاز من التدفقات التالية: m_A تدفق الهواء، m_F تدفق الوقود، m_V تدفق البخار الذي يستخدم لتقليل انبعاث NO_x :

$$(29.7) \quad m = m_A + m_F + m_V \quad [\text{kg/s}]$$

بحسب التدفق الكتلي للوقود من الاستطاعة الحرارية Q_F [kW] التي تتحرر باحتراق الوقود في حجرة الاحتراق والقيمة الحرارية الدنيا للوقود LCV [kJ/kg]:

$$(30.7) \quad m_F = Q_F / \text{LCV} \quad [\text{kg/kWh}]$$

سيتم حساب التدفق الكتلي للوقود m_F فيما يلي، وسيوضح أنه صغير بالمقارنة بالتدفق الكتلي للهواء m_A .

يُعرف الاستهلاك النوعي للحرارة في محطة العنفة الغازية q_{spec} بأنه نسبة الحرارة المضافة إلى العمل المفيد وواحدته [kg/kWh] حيث kWh هي الاستطاعة الكهربائية المُولدة:

$$(31.7) \quad q_{\text{spec}} = 3600 Q_S / P = 3600 / \eta_{\text{th}} \quad [\text{kJ/kWh}]$$

برفع المردود الحراري يزداد العمل النوعي المفيد للعنفة الغازية، وبالتالي ينخفض الاستهلاك النوعي للحرارة في المنشأة.

لرفع المردود الحراري للمحطة ذات العنفة الغازية يجب رفع درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة T_S وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة T_R .

يتم رفع المردود الحراري للمحطة ذات العنفة الغازية عن طريق:

- رفع نسبة الضغط β .

- زيادة درجة الحرارة عند الدخول إلى العنفة الغازية.

- التسخين الأولي المتجدد للهواء قبل إرساله إلى حجرة الاحتراق عن طريق غازات الاحتراق.

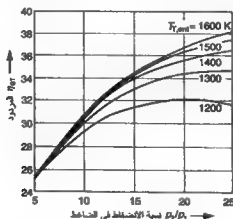
- الانضغاط على مراحل مع تبريد وسطي والتمدد على مراحل مع التخميص الوسطي.

تم تحليل تأثير نسبة الضغط β في الفقرة السابقة، وبين الجدول (2.7) والشكل (3.7) العلاقة بين المردود الحراري η_{th} ونسبة الضغط β من أجل دورة عمل جول المثالية. فمثلاً يزداد المردود الحراري لدورة عمل جول من 36.9 إلى 65.1% عند رفع نسبة الضغط من 5 إلى 30، وتصل قيمة نسبة الضغط إلى 15 وحتى 30 في العنفات الغازية الحديثة ذات المردود العالي المستخدمة لتوليد التيار الكهربائي.

أما في العنفات المستعملة فعلياً فهناك حدود عليا لدرجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة مرتبطة بمادة (معدن) شفرات العنفة الغازية وطريقة التبريد المستخدمة. تبلغ درجة الحرارة عند الدخول إلى العنفة الغازية حالياً من أجل العنفة الغازية ذات المردود العالي للجيلين الثاني والثالث القيمة 1100 إلى 1250°C.

يتعلق مردود العنفة الغازية بالتدفق الكتلي للغاز ودرجة حرارته لدى دخوله إلى العنفة الغازية وبارتفاع موقع العنفة عن سطح البحر.

يؤدي رفع درجة حرارة الغاز لدى دخوله إلى العنفة الغازية إلى ارتفاع كبير في مردود العنفة، وبين الشكل (6.7) تأثير درجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة $T_{T,ent}$ على نسبة الضغط p_2/p_1 وعلى المردود الحراري η_{GT} لمحطة العنفة الغازية. هناك قيمة مثلى لنسبة الضغط (من أجل درجة حرارة معينة لدى دخول الغازات إلى العنفة) يتحقق عندها الوصول إلى العمل النوعي المفيد الأعظمي.



الشكل 6.7 : مردود محطة العنفة الغازية η_{GT} وعلاقته بنسبة الانضغاط p_2/p_1 ودرجة حرارة الغاز لدى دخوله العنفة $T_{T,ent}$.

تؤثر درجات الحرارة امتصاص الهواء المرتفعة إلى الضاغطة بشكل غير مناسب على مردود العنفة الغازية. ولذلك تكون استطاعة العنفة الغازية في الصيف أقل منها في الشتاء. تحدد القيم القياسية عند شروط ISO [أي عند مستوى سطح البحر حيث الارتفاع = صفر، الضغط 1.013 bar درجة الحرارة 15 °C، الرطوبة النسبية للهواء 60 %].

تزداد كثافة الهواء عند درجات حرارة أدنى وعند ضغط أعلى للهواء الخارجي مقارنة بالقيمة المقبولة عند شروط ISO القياسية. يزداد التدفق الكتلي للهواء عند انخفاض درجة الحرارة للهواء الخارجي، ولذلك فإن استطاعة العنفة الغازية في الشتاء أعلى منها في الصيف. كذلك تنخفض استطاعة نفس العنفة عند تركيبها في موقع أعلى.

من الإجراءات الأخرى لرفع مردود محطة العنفة الغازية هناك التسخين الأولي للمتجدد للهواء والتبريد الوسيط والتحميص الوسيط لوسيط العمل، وستعرض لهذا في الفقرات القادمة.

2.37 التسخين الأولي للمتجدد للهواء

تتعلق درجة الحرارة التي تغادر عندها الغازات العنفة بدرجة الحرارة لهذه الغازات لدى دخولها إلى العنفة ونسبة الضغط.

يعطي الجدول (3.7) درجات حرارة الغازات لدى مغادرتها للعنفة الغازية عند مختلف درجات الحرارة أثناء الدخول $T_{T,ex}$ وعند مختلف نسب الضغط β . القيم المختارة لـ $T_{T,ex}$ و β تمثل الجليدين الثاني والثالث من العنفات الغازية الحديثة.

الجدول 3.7: درجة حرارة الغازات لدى مغادرتها للعنفة الغازية [°C] وعلاقتها بدرجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة ونسبة الضغط β للمردود الداخلي للعنفة الغازية 0.9.

نسبة الضغط β		درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة [°C]
30	15	
330	423	1000
448	560	1250
566	696	1500

كذلك يبين الجدول (3.7) بأن درجة حرارة الغازات المغادرة للعنفة

— تزداد مع ارتفاع درجة حرارة الغازات لدى دخولها عند ثبات نسبة الضغط.

— تتناقص مع ارتفاع نسبة الضغط عند ثبات درجة حرارة دخول الغازات.

في محطات العنفات الغازية التي تتراوح درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة فيها بين 1100 و 1250 °C تكون درجة حرارة الغازات عند المغادرة بين 450 و 620 °C تبعاً لنسبة الضغط. تكون الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق عند درجات الحرارة هذه عالية جداً ومن ثم يكون المردود منخفضاً.

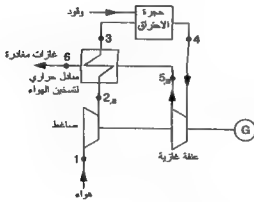
يمكن تحسين مردود محطة العنفة الغازية المفتوحة بشكل جوهري عن طريق استخدام الحرارة التي تحملها الغازات المغادرة للعنفة لتسخين الهواء الذي تم رفع ضغطه في الضاغط تسخيناً أولياً.

عن طريق التسخين الأولي المتحد للهواء يتناقص الاستهلاك النوعي للوقود في حجرة احتراق العنفة الغازية، وتخفض درجة حرارة غازات الاحتراق التي تطرد إلى الوسط الخارجي.

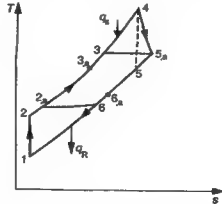
يبين الشكل (a7.7) بشكل تخطيطي محطة عنفة غازية مزودة بمبادل حراري لتسخين الهواء تسخيناً أولياً، وبين الشكل (b7.7) دورة عمل هذه المنشأة على المخطط $T-s$.

من الممكن نظرياً الاستفادة من فرق درجات الحرارة المتاح في مسخن الهواء ($T_{3R} - T_{2R}$) بشكل كامل وبدون ضياعات من أجل تسخين الهواء بشكل متجدد تسخيناً أولياً.

في هذه الحالة يجري تسخين الهواء من T_{2R} إلى $T_{3R} = T_{5R}$ بشكل متجدد، وغازات الاحتراق تبرد عندئذ من T_{3R} إلى T_{6R} .



(a) مخطط تدفق السوائل



(b) مخطط $T-s$

الشكل 7.7 : المنشأة ذات العنفة الغازية والتسخين الأولي للهواء المتجدد.

من أجل منشأة ذات عنفة غازية وتسخين أولي للهواء ومتحدد وكامل تطبيق العلاقات التالية:
(a) كمية الحرارة النوعية المضافة أو المطروحة [kJ/kg]:

$$(32.7) \quad q_{s,reg} = c_p (T_4 - T_3) = c_p (T_4 - T_{5,reg})$$

$$(33.7) \quad q_{R,reg} = c_p (T_6 - T_1) = c_p (T_{2,reg} - T_1)$$

(b) العمل النوعي المفيد [kJ/kg]:

$$(34.7) \quad \begin{aligned} w_{n,reg} &= w_T - w_{comp} = (T_4 - T_{5,reg}) - (T_{2,reg} - T_1) \\ &= c_p (T_4 - T_{5,reg}) - (T_{2,reg} - T_1) \end{aligned}$$

المردود الحراري للمنشأة ذات العنفة الغازية والتسخين الأولي الكامل المتحدد للهواء:

$$(35.7) \quad \eta_{th,reg} = w_{n,reg} / q_{s,reg} = [(T_4 - T_{5,reg}) - (T_{2,reg} - T_1)] / (T_4 - T_3)$$

في محطات العنفات الغازية ذات التسخين الأولي المتحدد للهواء تكون درجة حرارة الهواء الفعلية التي يمكن الوصول إليها $T_{3,reg}$ أقل من T_3 ، وتكون درجة الحرارة الفعلية لخروج الغازات من العنفة $T_{6,reg}$ أقل من T_6 (الشكل b7.7).

تتحدد قابلية انتقال الحرارة لمسخن هواء أولي حقيقي عن طريق عامل الفعالية ε الذي هو نسبة الاستطاعة الحرارية الفعلية للمبادل الحراري إلى النظرية، أي:

$$(36.7) \quad \varepsilon = (T_{3,reg} - T_{2,reg}) / (T_{5,reg} - T_{2,reg})$$

حيث: $(T_{3,reg} - T_{2,reg})$ الارتفاع الفعلي لدرجة الحرارة

$(T_{5,reg} - T_{2,reg})$ فرق درجات الحرارة المتوفر بين الغاز المغادر للعنفة والهواء في المبادل الحراري.

تتراوح قيمة ε عملياً بين 0.6 و 0.8.

تبلغ الدرجة الفعلية للهواء أو لغازات الاحتراق عند مخرج المبادل الحراري:

$$(37.7) \quad T_{3,reg} = T_{2,reg} + \varepsilon (T_{5,reg} - T_{2,reg})$$

أو

$$(38.7) \quad T_{6,reg} = T_{5,reg} + \varepsilon (T_{5,reg} - T_{2,reg})$$

من أجل محطة عنفة غازية تحوي مبادلاً حرارياً فعلياً تطبيق العلاقات التالية:

(a) لحساب الحرارة النوعية المضافة أو المطروحة [kJ/kg]:

$$(39.7) \quad q_{s,reg} = c_p (T_4 - T_{3,reg}) = c_p [T_4 - T_{2,reg} - \varepsilon (T_{5,reg} - T_{2,reg})]$$

(40.7)

$$q_{R,reg} = c_p (T_{6,R} - T_1)$$

(b) لحساب العمل النوعي المفيد [kJ/kg]

(41.7)

$$w_{a,reg} = c_p [(T_4 - T_{5,R}) - (T_{2,R} - T_1)]$$

كذلك فإن:

(42.7)

$$w_{a,reg} = q_{a,reg,a} - q_{R,reg,a}$$

ويمكن الآن حساب المردود الحراري لمحطة العنفة الغازية عند إجراء التسخين الأولي للهواء كما

يلي:

(43.7)

$$\eta_{th,reg,a} = w_{a,reg,a} / q_{a,reg,a}$$

وتُحسب النسبة بين مردود محطة العنفة الغازية مع مبادل حراري لتسخين الهواء تسخيناً أولياً

وبين مردودها بدون المبادل بشكل تقريبي كما يلي:

(44.7)

$$\eta_{th,reg,a} / \eta_{th} = (T_4 - T_{2,R}) / (T_4 - T_{3,R})$$

سيتم في المثال 4.7 تحليل تأثير التسخين الأولي المتجدد للهواء على المردود الحراري للعنفة

الغازية.

4.7 مثال

كيف يتغير المردود الحراري لعنفة غازية (المثال 3.7) إذا استخدمت حرارة غازات الاحتراق لتسخين الهواء تسخيناً أولياً متجدداً؟ عامل فعالية مسخن الهواء $\epsilon = 0.75$ ، تعمل المنشأة عند نسبة ضغط 15، درجة حرارة دخول الهواء إلى الضاغط 10 °C والغازات إلى العنفة الغازية 1100 °C. المردود الداخلي للعنفة 0.92 وللضاغط 0.89.

الحل

1. تؤخذ من المثال 3.7 القيم التالية (انظر الشكل (b7.7): $T_{2,R} = 654.3 \text{ K}$ ، $T_1 = 283 \text{ K}$ ،

$$w_{a,R} = 310.6 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{T,R} = 683.8 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{comp,R} = 373.2 \text{ kJ/kg}$$

$$T_{5,R} = 692.6 \text{ K}$$

$$T_4 = 1373 \text{ K}$$

$$\eta_{th,R} = 0.43$$

$$q_{a,R} = 722.3 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{kJ/kg}$$

2. درجة حرارة الغازات الفعلية بعد مسخن الهواء الأولي:

$$T_{3,R} = T_{2,R} + \epsilon (T_{5,R} - T_{2,R})$$

$$= 654.3 + 0.75 (692.6 - 654.3) = 683 \text{ K}$$

ودرجة حرارة الهواء الفعلية بعد المسخن الأولي للهواء:

$$T_{6,a} = T_{5,a} + \epsilon(T_{5,a} - T_{2,a})$$

$$= 692.6 + 0.75(692.6 - 654.3) = 663.9 \text{ K}$$

3. تحسب كمية الحرارة النوعية المضافة إلى المنشأة ذات العنفة الغازية أو المطروحة منها مع وجود تسخين أولي متحدد للهواء كما يلي:

$$q_{s,reg,a} = c_p(T_4 - T_{3,a})$$

$$= 1.005 \text{ kJ/kg} (1373 - 683) \text{ K} = 693.4 \text{ kJ/kg}$$

$$q_{R,reg,a} = c_p(T_{6,a} - T_1)$$

$$= 1.005 \text{ kJ/kg} (663.9 - 283) \text{ K} = 382.8 \text{ kJ/kg}$$

4. يبقى العمل النوعي المفيد للعنفة الغازية ثابتاً أي $w_{u,a} = 310.6 \text{ kJ/kg}$ ، وبالتالي فالردود الحراري للمنشأة مع تسخين أولي متحدد للهواء:

$$\eta_{th,reg} = w_{u,a} / q_{s,reg,a} = 310.6 / 693.4 = 0.448$$

5. بالمقارنة مع الردود المحسوب في المثال 3.7 حيث $\eta_{th,a} = 0.43$ فإن الردود $\eta_{th,reg}$ قد ارتفع بمقدار $\% 4.2 = (0.448 - 0.43) / 0.43$.

سيتم في المثال 5.7 تحليل تأثير درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة على الردود الحراري وعلى العمل النوعي المفيد لمحطة العنفة الغازية.

مثال 5.7

كم يبلغ الردود الحراري والعمل النوعي المفيد لمحطة عنفة غازية نسبة الضغط لها 15 درجة حرارة دخول الهواء إلى الضاغط 10 °C. الردود الداخلي للعنفة الغازية 0.92 وللضاغط 0.89 المنشأة بدون تسخين أولي متحدد للهواء ودرجة حرارة دخول الغاز إلى العنفة 950 °C و 1250 °C حسب الحال. قارن النتائج بتلك الواردة في المثال 4.7.

الحل

1. من المثال 4.7 نجد:

$$w_{u,a} = 373.2 \text{ kJ/kg}, \eta_{th,a} = 0.43, \beta = 15, w_{comp,a} = 373.2 \text{ kJ/kg}, T_{2,a} = 654.3 \text{ K}, T_1 = 283 \text{ K}$$

$$T_3 = 1100^\circ\text{C} = 1373 \text{ K} \text{ من أجل } \text{kJ/kg}$$

2. من أجل درجة حرارة دخول إلى العنفة $T_3 = 950^\circ\text{C} = 1223 \text{ K}$ ، $\beta = 15$ ، $\eta_{IT} = 0.92$. فإنه :

(a) تحسب درجة حرارة الغاز بعد التمدد في العنفة كما يلي :

$$\begin{aligned} T_{4,a} &= T_3 - (T_3 - T_4) = \eta_{IT} \\ &= T_3 [1 - (1 - 1/\beta^{(k-1)/k}) \eta_{IT}] \\ &= 1223 [1 - (1 - 1/15^{0.2857}) 0.92] = 616.9 \text{ K} \end{aligned}$$

(b) يحسب عمل التمدد النوعي أو العمل النوعي المفيد للدورة العمل كما يلي :

$$\begin{aligned} w_{T,a} &= c_p(T_3 - T_{4,a}) \\ &= 1.005 \text{ kJ/kgK} (1223 - 616.9) \text{ K} = 609.1 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w_{u,a} &= w_{T,a} - w_{\text{comp},a} \\ &= 609.1 \text{ kJ/kg} - 373.2 \text{ kJ/kg} = 235.9 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

(c) كمية الحرارة النوعية المضافة :

$$\begin{aligned} q_{s,a} &= c_p(T_3 - T_{2,a}) \\ &= 1.005 \text{ kJ/kg} (1223 - 654.3) \text{ K} = 571.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

(d) للردود الحراري :

$$\begin{aligned} \eta_{th,a} &= w_{u,a}/q_{s,a} \\ &= 235.9 \text{ kJ/kg} / 571.5 \text{ kJ/kg} = 0.413 \end{aligned}$$

3. عندما تكون درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية $T_3 = 1250^\circ\text{C} = 1523 \text{ K}$ تصبح القيم

الجديدة كما يلي :

$$\begin{aligned} T_{4,a} &= T_3 [1 - (1 - 1/\beta^{(k-1)/k}) \eta_{IT}] \\ &= 1523 [1 - (1 - 1/15^{0.2857}) 0.92] = 768.2 \text{ K} \end{aligned} \quad (a)$$

$$\begin{aligned} w_{T,a} &= c_p(T_3 - T_{4,a}) \\ &= 1.005 (1523 - 768.2) = 758.2 \text{ K} \end{aligned} \quad (b)$$

$$\begin{aligned} w_{u,a} &= w_{T,a} - w_{\text{comp},a} \\ &= 758.5 - 373.2 = 385.3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} q_{s,a} &= c_p(T_3 - T_{2,a}) \\ &= 1.005 (1523 - 654.3) = 873 \text{ kJ/kg} \end{aligned} \quad (c)$$

$$\eta_{th,s} = w_{th,s} / q_{th,s} \quad (d)$$

$$= 385.3 / 873 = 0.441$$

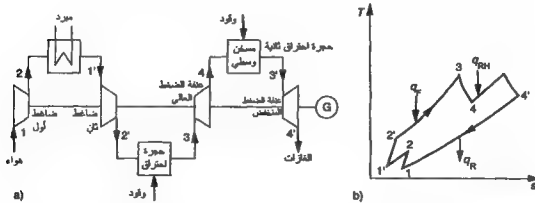
تم ترتيب النتائج في الجدول 4.7.

الجدول 4.7: تأثير درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية على المردود الحراري η_{th} والعمل النوعي المفيد w_{th} لمخطة العنفة الغازية. القيم المرجعية هي: $T_3 = 1100^\circ\text{C}$ ، $\beta = 15$ ، $T_1 = 283^\circ\text{C}$ ، $w_{th,s} = 310.6 \text{ kJ/kg}$ ، $\eta_{th,s} = 0.43$

درجة حرارة الدخول إلى العنفة الغازية [°C]	η_{th}	$\Delta \eta_{th} / \eta_{th,\beta}$ [%]	w_{th} [kJ/kg]	$\Delta w_{th} / w_{th,\beta}$ [%]
950	0.413	- 4	235.9	-24
1100	0.430	-	310.6	-

3.3.7 التبريد الوسيطى والتسخين الوسيطى

يمكن رفع درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة عن طريق الانضغاط على مراحل مع التبريد الوسيطى والتمدد على مراحل في العنفة الغازية مع التسخين الوسيطى. وبذلك تزداد الاستطاعة المقدمة من العنفة وكذلك المردود الحراري للمنشأة.



الشكل 8.7: منشأة ذات عنفة غازية يحدث فيها الانضغاط على مرحلتين (a) مخطط تسلسل الأجزاء مخطط T-s. (b)

يبين الشكل (8.7) مخطط دورة عمل عنفة غازية ذات انضغاط على مرحلتين وتبريد وسيطى للهواء وكذلك ذات تمدد على مرحلتين مع التسخين الوسيطى.

من أجل هذه المنشأة التي يكون فيها الانضغاط والتمدد عند نفس التغيرات لدرجة الحرارة في كل مرحلة تطبق العلاقات التالية:

(a) العمل النوعي المفيد لكل kg من الوسيط العامل:

$$\begin{aligned} w_{u,a} &= (w_{T1} + w_{T2}) - (w_{comp1} + w_{comp2}) \\ (45.7) \quad &= 2c_p [(T_3 - T_4) \eta_{IT} - (T_2 - T_1) / \eta_{i,comp}] \quad [\text{kJ/kg}] \end{aligned}$$

(b) كمية الحرارة النوعية المضافة في حجرة الاحتراق الأولى (دليلها C.C) وفي عملية التسخين الوسطي في حجرة الاحتراق الثانية (دليلها RH):

$$(46.7) \quad q_s = q_{cc} + q_{RH} = c_p [(T_3 - T_2) + (T_3' - T_4)] \quad [\text{kJ/kg}]$$

(c) كمية الحرارة النوعية المطروحة:

$$(47.7) \quad q_R = c_p (T_{4'} - T_1) \quad [\text{kJ/kg}]$$

(d) المردود الحراري لمحلة العنفة الغازية:

$$(48.7) \quad \eta_{th} = w_{u,a} / q_s$$

الحرارة المطروحة من مورد الهواء:

$$(49.7) \quad q_c = c_p (T_2 - T_{1'}) \quad [\text{kJ/kg}]$$

تُحسب درجتا الحرارة الفعليتان T_2 و $T_{4'}$ عن طريق المعادلتين 21.7 و 22.7. وتُحسب الاستطاعة الحرارية المفيدة المكتسبة من محطة العنفة الغازية كما يلي:

$$(50.7) \quad P = m w_{u,a} \quad [\text{kW}]$$

حيث: m التدفق الكتلي لوسيط العمل في الضاغط والعنفة الغازية $[\text{kg/s}]$.

في الحالة العامة ومن أجل n_{comp} مرحلة للانضغاط مع التبريد الوسطي ومن أجل n_T مرحلة للتمدد مع التسخين الوسطي فإن كميات الحرارة النوعية $[\text{kJ/kg}]$ والمردود الحراري تُحسب كما يلي:

$$\begin{aligned} w_{u,a} &= n_T w_{T,a} - n_{comp} w_{comp,a} \\ (51.7) \quad &= c_p [n_T (T_3 - T_{4'}) \eta_{IT} - n_{comp} (T_{2s} - T_1) / \eta_{i,comp}] \end{aligned}$$

$$(52.7) \quad q_s = c_p [(T_3 - T_2) + (n_T - 1) (T_3' - T_{4'})]$$

$$(53.7) \quad q_R = c_p (T_{4'} - T_1)$$

$$(54.7) \quad q_c = c_p (T_2 - T_1) (\eta_{\text{comp}} - 1)$$

$$(55.7) \quad \eta_{\text{th}} = w_{\text{a,a}} / q_s$$

حيث: T_{2s} و T_{4s} درجتا الحرارة بعد الانضغاط الايزنتروبي أو التمدد الايزنتروبي ($s = \text{const}$)
 T_2 ، T_3 ، T_4 درجات الحرارة بعد الانضغاط الثاني، وقبل العنفة الثانية T_2 وبعدها.

إذا بلغ عدد المراحل اللامائية و $\eta_{\text{comp}} = 1$ نحصل على مردود دورة عمل كير (Ackeret - Keller) المؤلف من عمليتين بثبوت درجة الحرارة وعمليتين بثبوت الضغط. حيث يجري تبريد وسيط العمل بين مراحل الانضغاط بثبوت الضغط إلى درجة الحرارة الابتدائية، وكذلك يجري تسخينه بعد كل مرحلة تمدد ثانية إلى درجة حرارة الدورة الأعظمية وذلك بثبوت الضغط. المردود الحراري لدورة العمل هذه مساوٍ للمردود الحراري لدورة عمل كارنو ذات درجة الحرارة الأعظمية T_3 ودرجة الحرارة الصغرى T_1 :

$$(56.7) \quad \eta_{\text{th}} = 1 - T_1 / T_3$$

جرّاء التكاليف العالية للأجزاء الإضافية فإنه في الوقت الحاضر لا يوجد عملياً إلا تبريد وسطي وحيد وتسخين وسطي وحيد.

يبين المثال 6.7 حساب الاستطاعة الكهربائية والاستهلاك النوعي للوقود لعنفة غازية.

6.7 مثال

محطة عنفة غازية لها المواصفات التالية: نسبة الضغط 15، درجة حرارة دخول الهواء إلى المضغط 10 °C وإلى العنفة الغازية 1100 °C. المردود الداخلي للعنفة 0.92 وللضغط 0.89، التدفق الكتلي للهواء 610 kg/s. يطلب تحديد ما يلي: استهلاك الغاز الطبيعي في حجرة احتراق العنفة الغازية والاستطاعة الكهربائية. القيمة الحرارية الدنيا للغاز الطبيعي $\text{LCV} = 46780 \text{ kJ/kg}$ ، مردود المولدة الكهربائية 0.98.

الحل

1. من المثال 3.7 نحصل على القيم التالية: $\beta = 15$ ، $T_1 = 283 \text{ K}$ ، $T_{2,a} = 654.3 \text{ K}$ ، $T_3 = 1373 \text{ K}$

$$q_{s,a} = w_{\text{a,a}} - 310.6 \text{ kJ/kg} \quad w_{\text{r,a}} = 683.8 \text{ kJ/kg} \quad w_{\text{comp,a}} = 373.2 \text{ kJ/kg} \quad T_{4,a} = 692.6 \text{ K}$$

$$\eta_{\text{th,a}} = 0.43 \quad 722.3 \text{ kJ/kg}$$

2. تحسب استطاعة التشغيل الفعلية اللازمة للمضغط بدلالة التدفق الكتلي للهواء $m_A = 610 \text{ kJ/s}$:

$$P_{comp} = m_A w_{comp,a}$$

$$= 610 \text{ kg/s} \times 373.2 \text{ kJ/kg} = 227652 \text{ kW}$$

3. الاستهلاك النوعي للوقود في حجرة احتراق العنفة الغازية:

$$m_F = m_A q_{s,a} / LCV$$

$$= 610 \text{ kg/s} \times 722.3 \text{ kJ/kg} / 46780 \text{ kJ/kg} = 9.42 \text{ kg/s}$$

4. تدفق الغازات المفادرة للعنفة:

$$m_G = m_A + m_F$$

$$= 610 \text{ kg/s} + 9.42 \text{ kg/s} = 619.42 \text{ kg/s}$$

5. الاستطاعة الفعلية للعنفة الغازية:

$$P_T = m_G w_{T,a}$$

$$= 619.42 \text{ kg/s} \times 683.8 \text{ kJ/kg} = 423559 \text{ kW}$$

6. الاستطاعة الكهربائية للمنشأة

$$P_{el} = \eta_G (P_T - P_{comp})$$

$$= 0.98 (423559 - 227652) = 191989 \text{ kW}$$

4.7 أجزاء المحطة

1.4.7 مجموعة العنفة (العنفة الغازية + المولدة الكهربائية)

تستخدم العنفات الغازية الثابتة لتشغيل المولدات الكهربائية في محطات توليد الطاقة، ويتصل في مجموعة العنفة كل من العنفة والمولد والضاغط التوربيني. تحتاج محطات العنفات الغازية مقارنة بالآلات الحرارية الأخرى إلى أقل قدر من المساحة وحجم البناء والكتلة للمعدات، وتبلغ تكاليف المعدات للمنشأة ذات العنفة الغازية 50 حتى 60 % فقط من تكاليف معدات المنشأة ذات العنفة البخارية.

تُحدد استطاعة العنفة عن طريق التدفق الكلي وهبوط الإنتالي لوسيط العمل (الهواء) مع مراعاة الضياعات الداخلية. تعطى استطاعة ومردود العنفة عند الشروط المحيطة وفقاً لمعايير الـ ISO أي عند مستوى البحر (الارتفاع صفر عن مستوى سطح البحر) والضغط $p = 1.013 \text{ bar}$

ودرجة الحرارة $t = 15^{\circ}\text{C}$ ، من أجل التصحيح عند الارتفاع عن مستوى البحر يُعتبر بأن الاستطاعة تنخفض بمعدل 1.12 % لكل 100 m ارتفاع بسبب انخفاض الكثلة النوعية للهواء. كذلك يلزم تصحيح آخر بسبب ضياع الضغط.

يبلغ ضياع الاستطاعة 1.2 إلى 2.5 % لكل 1 kPa ضياع في الضغط في قناة امتصاص الضغوط و 0.5 إلى 1.5 % لكل 1 kPa ضياع في الضغط في مجرى تصريف الغازات من العنفة الغازية. يتحدد مردود محطة العنفة الغازية عن طريق نسبة الضغط p ودرجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية. تستخدم في محطات توليد الطاقة على الأغلب عنفات غازية ذات محور وحيد تعمل عند قيمة p تتراوح بين 10 و 16 مع انضغاط أحادي المرحلة. تبلغ أكبر استطاعة للعنفات التي تتولد فيها الكهرباء بتردد 50 هرتز في الوقت الحاضر MW 240 (عند شروط الـ ISO) من أجل تدفق كتلي للهواء قدره 640 kg/s وعند درجة حرارة دخول إلى العنفة تبلغ حوالي 1230°C . للتردد 60 هرتز ينتج MW 170 و 454 kg/s.

من أجل تصميم أمثل تعمل العنفة عند سرعات عالية إذا كانت الاستطاعة الكهربائية أقل من MW 70، تربط العنفة عادة بالمولدة الكهربائية عن طريق علبة سرعة.

تصمم شفرات العنفة من أجل عمر قدره 50000 حتى 100000 ساعة عمل.

تبلغ استطاعة عنفات سيمنس من السلسلة الجديدة 70 حتى MW 240.

ويبين الجدول (5.7) المعطيات الفنية لعنفات سيمنس V84.2، V94.2، V64.3A، V84.3A، V94.3A.

المجدول 5.7: المعطيات الفنية لعنفات سيمنس الغازية، السلسلة 2 و 3A الوقود: غاز طبيعي شروط ISO القياسية هي 15°C و 1013 mbar، عند مستوى سطح البحر.

نموذج العنفة الغازية	V84.2	V94.2	V64.3A	V84.3A	V94.3A
الاستطاعة الكهربائية [MW]	109	159	70	170	240
التردد [Hz]	60	50	50/60	60	50
المردود [%]	34.0	34.5	36.8	38.0	38.0
نسبة الضغط	11.0	11.1	16	16	16
تدفق الغازات الكتلي [kg/s]	360	519	194	454	460
درجة حرارة مغادرة العنفة [$^{\circ}\text{C}$]	544	540	565	562	562
إصدار NO_x [ppm]*	25	25	< 25	< 25	< 25

* المقصود بـ ppm جزء بالمليون (parts per million)

أما الجدول (6.7) فيتضمن مواصفات الأداء لمجموعة العنف 26 GT من شركة ABB محطة الطاقة AG.

الجدول 6.7: مواصفات مجموعة العنف 26 GT (عند شروط ISO) من صنع شركة ABB لمحطات الطاقة AG. الوقود المستخدم: غاز طبيعي. الشروط القياسية ISO هي 15 °C و 1013 mbar وعند مستوى سطح البحر.

الوصف	الوحدة	القيمة
الاستطاعة	MW	240
المردود (الكفاءة)	%	37.8
نسبة الضغط	-	30
التدفق الكلي	kg/s	542
درجة حرارة الغاز	°C	610
عدد المراحل	-	5
— العنف	-	22
— الضاغط	-	
العدد		
— حجرة الاحتراق (قليلة الإصدار للغازات الضارة)	-	2
— حرق لكل حجرة احتراق	-	30/24
انبعاث NO _x (عند عتري 15% أو كسحين في الغازات)	*ppm	< 25
* ppm = parts per million (جزء من المليون)		

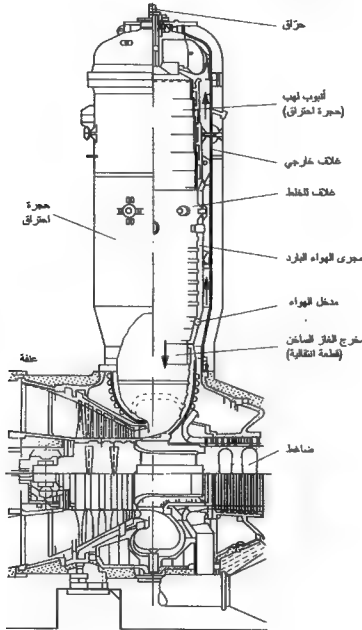
لقد تضمنت عنفات الاستطاعات التالية 26 GT من شركة ABB و V94.3A من شركة Siemens /KWU أحدث التطورات في هندسة العنفات الغازية، وهي بذلك تحقق أعلى مردود مع ضمان إصدار قليل لـ NO_x عند إحراق الغاز الطبيعي والوقود السائل الثقيل (فيول أويل). تتميز العنف الغازية 26 GT بإحتراق ثنائي المراحل في حجري احتراق قليل الإصدار للغازات الضارة.

يُعرف مردود مجموعة العنف (العنف الغازية مع المولد الكهربائي) بأنه نسبة استطاعة المولدة الكهربائية إلى الاستطاعة الحرارية الداخلة (المقدمة).

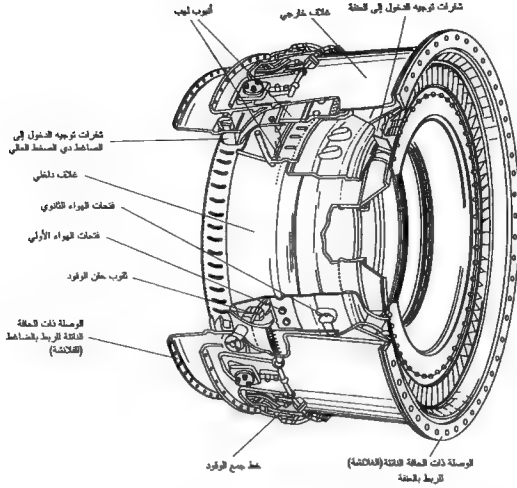
2.4.7 حجرة الاحتراق والحرق اللذان يصدران قدرًا ضئيلاً من الغازات الضارة

استخدمت قديماً حجرة الاحتراق المفردة أو التي تأخذ شكل صومعة (Silo) في محطات توليد الطاقة ذات العنف الغازية، و(الشكل 9.7) ولكن في الآونة الأخيرة استخدمت حجر الاحتراق التي

لها شكل حلقي في محطات توليد الطاقة، والتي كان قد جرى تطويرها أصلاً من أجل محركات الطائرات النفاثة. وهي حجرة احتراق تمتاز بقلة إصدارها للغازات الضارة وتعدد الحراقات المركبة عليها والمتجمعة بين الضاغط والعنفة.



الشكل 9.7 : حجرة احتراق وحيدة (المصدر شركة ABB).
يبين الشكل (10.7) حجرة احتراق لعنفة غازية حلقي الشكل.

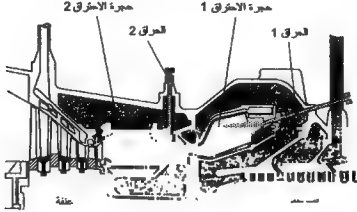


الشكل 10.7 : حجرة الاحتراق الحلقية مع احتراق على مرحلتين.

يتراوح تحميل حجرة الاحتراق بين 40 (من أجل حجرة احتراق واحدة) و 800 MW/m^3 (حجر الاحتراق الحلقية الشكل). يتم تبريد جدار حجرة الاحتراق المصنوعة من خليطة Ni (النيكل) و CO (الكربالت) بالحمل والتبريد الغشائي (film).

تساعد درجات الحرارة العالية السائلة في حجرة الاحتراق (حوالي 1500°C) على تشكيل NO_x في حجرة الاحتراق. ولتقليل انبعاث NO_x تستخدم حراقات ذات إصدار قليل للغازات الضارة. هناك نوعان من الحراقات: الأول انتشاري (diffusion Burner) والثاني ذو خلط أولي (Pemixing B). في النوع الأول لا يختلط الوقود مع الهواء إلا في حجرة الاحتراق. نشير هنا أن استخدام النوع الثاني من الحراقات (أي ذات الخلط الأولي) يُستخدم لتقليل انبعاث NO_x . تنخفض في هذه الحالة درجة الحرارة في حجرة الاحتراق وبالتالي يتناقص تشكل NO، ويتم تحقيق ذلك عن

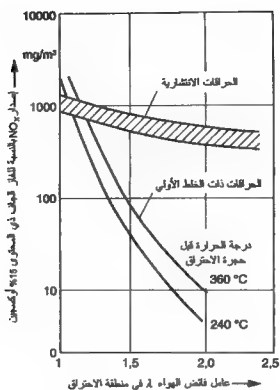
طريق الاختيار الأمثل لنسبة الهواء إلى الوقود في احتراق ثنائي المراحل في حجرة الاحتراق (الشكل 11.7). يتم الاحتراق في هذه الحالة من أجل عامل فائض هواء $\lambda = 0.6$ في المرحلة الأولى و $\lambda = 2$ في المرحلة الثانية للاحتراق. كذلك يمكن تخفيض انبعاث NO_x عن طريق تشغيل الحراقات وإيقافها عن العمل أثناء تشغيل العنفة.



الشكل 11.7 : حجرة الاحتراق الحلقية مع احتراق على مرحلتين.

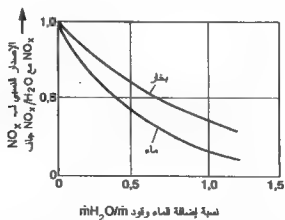
تستخدم في الوقت الحاضر الطريقة الرطبة التي تتضمن إضافة الماء والبخار إلى الحراق بقصد تخفيض انبعاث NO_x . مساوئ هذه الطريقة هي الاستهلاك الكبير للماء الخالي من الأملاح وتخفيضها للمردود. يبلغ الاستهلاك الساعي للماء من أجل منشأة استطاعتها 100 MW حوالي 25 m^3 . يتأثر المردود بنسبة الماء إلى الوقود، ومن أجل $f = 1$ ينخفض المردود حوالي 5%.

تقدم طرق الإحراق المبتدعة لتقليل انبعاث الغازات الضارة على استخدام الحراقات ذات الخلط الأولى، وعندها لا يُضاف أية كميات من الماء أو البخار إلى الحراق. عند عمل العنفة الغازية بالحمولة الكاملة تُمكن الحراقات ذات الخلط الأولى من الوصول إلى احتراق كامل للغاز الطبيعي لزيت الوقود السائل الخفيف (المازوت) *gasoil* مع انبعاث قليل جداً لـ NO_x . عند بدء التشغيل وعندما تكون حمولة العنفة صغيرة (حتى 40% من الحمولة الكاملة) فإن الحراقات ذات الخلط الأولى السائدة حالياً لا تستطيع تأمين احتراق مستقر، ولذلك تستخدم في هذه الحالة الحراقات الانتشارية مع إضافة للماء. يبين الشكل (12.7) انبعاث NO_x من أجل غاز جاف محتواه من الأوكسجين 15% وعلاقة ذلك بعامل فائض الهواء λ لكلٍ من الحراقات الانتشارية والحراقات ذات الخلط الأولى.



الشكل 12.7 : إصدار NO_x بالنسبة للغاز الجاف ذي المحتوى 15% أو أكسجين وارتباطه بعامل زيادة الهواء في للحرق الانتشاري وذات الخلط الأولي.

كما يبين الشكل (13.7) تأثير إضافة الماء أو البخار إلى حجرة الاحتراق على انبعاث NO_x .



الشكل 13.7 : تأثير إضافة الماء أو بخار الماء إلى حجرة الاحتراق على انبعاث NO_x .

5.7 مقارنة بين محطات الطاقة ذات العنفات الغازية والمحطات البخارية

- محطات الطاقة ذات العنفات الغازية مقارنة بالمحطات البخارية للزايا التالية:
 - قابلية كبيرة لرفع درجة الاستفادة من طاقة الوقود وذلك بإمكانية وصلها مع دورة بخار لتشكيل دارة مركبة (درجة الاستفادة الإجمالية تصل إلى 58%).
 - زمن إنشاء المحطة قصير.
 - التكاليف المنخفضة للمعدات (50 إلى 65 % من تكاليف محطة طاقة بخارية).
 - قصر زمن الإقلاع (من 5 إلى 15 — 20 دقيقة بحسب الحمولة).
 - صِغَر المكان اللازم (10 إلى 20 m² لكل MW، بينما تحتاج المحطة البخارية 50 حتى 80 m³/MW).
 - عدم الحاجة إلى مياه تبريد.
 - الاستهلاك الذاتي للضخلة للطاقة (أقل من 1 % من الاستطاعة الاسمية).
- من المساوئ المحتملة للمحطات ذات العنفات الغازية بالمقارنة مع المحطات البخارية انخفاض المردود وارتفاع إطلاق NO_x. لقد كان ذلك صحيحاً حتى قبل عدة أعوام. جرّاء انخفاض درجة دخول الغازات إلى العنفة الغازية وصِغَر نسبة الضغط فقد كان مردود العنفة الغازية بين 25 و 30%. أما انبعاث NO_x فقد كان مرتفعاً بسبب ارتفاع درجة حرارة حجرة الاحتراق. لكن التطور الهائل في هندسة العنفات الغازية خلال الفترة القصيرة الفائتة أدى إلى رفع مردود العنفة الغازية بشكل كبير، حيث تجاوز 38.5 % تبعاً لمعلومات المصنعين. لقد أمكن باستخدام مفاهيم حجات الاحتراق المحافظة على البيئة والتصاميم المبتكرة للحراقات تخفيض إطلاق NO_x بشكل كبير (عند إحراق الغاز الطبيعي في حالات مناسبة انخفض إصدار NO_x إلى ما دون 10 ppm)، ولذلك فإن عيوب (مساوئ) العنفات الغازية في الوقت الحاضر مقارنة بحسناها هي:
 - محدودة مرونتها عند اختيار الوقود المناسب [تستخدم في حجر احتراق العنفات الغازية الأنواع الجيدة ذات القيمة العالية من الوقود الغازي والوقود السائل الخفيف (المازوت (gasoil)].
 - قصر عُمر شفرات العنفة الغازية.
 - ضرورة تخميد الصوت.

وفقاً لمعايير عام 1997 فإن أعلى مردود لعنفة ذات استطاعة عالية في محطات الطاقة يمكن أن يصل إلى 39.5%.

استخدمت العنفات الغازية في الماضي في محطات الطاقة من اجل تغطية الذروة بسبب قصر الزمن اللازم لإقلاعها، أما الآن فتستخدم لتغطية الحمولة الأساسية.

يُستفاد في محطة الدارة المركبة (بخارية وغازية) من مزايا كلا العمليتين لرفع مردود عملية تحويل الطاقة. شرط الحصول على مردود إجمالي مرتفع في محطة دارة مركبة هو استخدام عنفة غازية ذات مردود عالٍ. وسنعرض هذا في الفصل الثامن.

8 محطات الدارة المركبة*

1.8 المحطة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار

تركيب وأنواع محطات الدارة المركبة

في محطة الدارة المركبة تُرتبط عنفة غازية تقوم بعملية أولى على التسلسل مع عنفة بخارية تقوم بمرورها بعملية ثانية

ترتبط العمليتان بالشكل الأمثل، وبحيث يتحقق الاستغلال الأمثل لطاقة الوقود. تستخدم في هذه المنشأة الحرارة للمضافة عند درجة الحرارة العالية في العنفة الغازية أولاً ومحدود عالٍ لتوليد الكهرباء، ثم تُستغل حرارة الغازات المغادرة للعنفة الغازية في عملية بخار تالية لتوليد الكهرباء أيضاً.

هناك نوعان أساسيان لهذه المنشآت:

— محطة الدارة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.

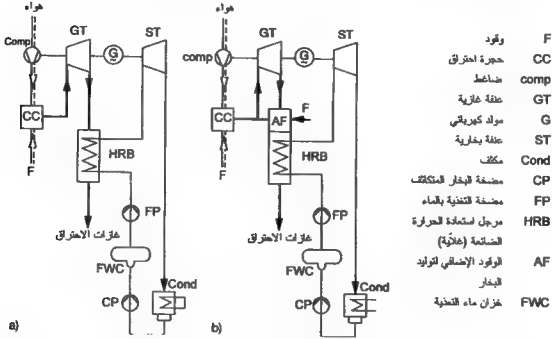
— محطة الدارة المركبة مع إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.

تتألف المنشأة في النوع الأول من دورة عمل لعنفة غازية يليها دورة عمل لعنفة بخارية. يبين الشكل (1.8) الأجزاء التي تتألف منها النوعان المذكوران أعلاه.

في النوع الأول يُحرق الوقود في حجرة احتراق العنفة الغازية فقط، ويتم تحويل الحرارة إلى عمل في العنفة الغازية والعنفة البخارية. يُولد البخار في مرجل (غلاية) استعادة (استرجاع) الحرارة الضائعة (heat recovery boiler) باستخدام الحرارة الضائعة المرتبطة مع غازات الاحتراق المغادرة للعنفة الغازية. أما البخار المغادر للعنفة البخارية فيجري تكثيفه وضخه عن طريق مضخة خاصة، ثم يرسل إلى خزان ماء التغذية حيث يُسحب منه الهواء. ليس هناك تسخين أولي لماء التغذية إلا في

* Combined Cycle Power Plants — للترجم

خزان ماء التغذية، وهذا يساعد على زيادة تبريد غازات الاحتراق في مرجل استعادة الحرارة الضائعة. درجة الحرارة للدنيا المسموح بها لغازات الاحتراق هي درجة حرارة التكاثر (الندى) لهذه الغازات، وهي تتعلق بالضغط الجزئية لبخار الماء وثاني أكسيد الكبريت في غازات الاحتراق، أي أنه لا يجوز أن تنخفض درجة حرارة ماء التغذية إلى ما دون درجة حرارة التكاثر، وكلما ازداد محتوى الوقود من الكبريت كلما توجب رفع درجة حرارة ماء تغذية المرجل.

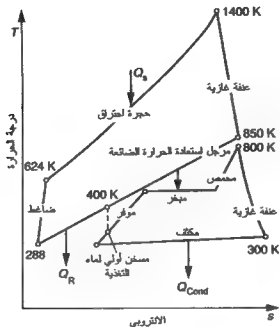


الشكل 1.8 : مبدأ عمل المحطات المركبة: (a) بدون احتراق وقود إضافي لتوليد البخار و (b) مع احتراق وقود إضافي لتوليد البخار.

يبين الشكل (2.8) دورة عمل محطة الدارة المركبة وذلك على المخطط T-s. تتألف دروة العمل الإجمالية من عملية العنفة الغازية وعملية المنشأة البخارية الموصولة بعدها.

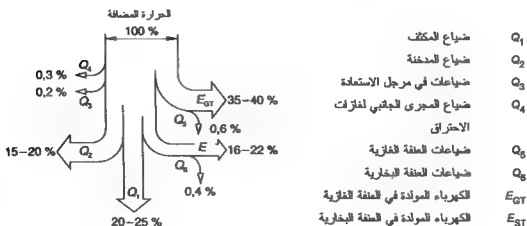
وستقدم في الوصف التالي توضيحاً لطريقة عمل محطة الدارة المركبة. يُضَغَطُّ الهواء ادياباتياً (بشكل كظيم) في الضاغط، ثم يُحْرَقُ الوقود بواسطة الهواء المضغوط وذلك في حجرة احتراق العنفة الغازية عند ضغط ثابت، وبعدها تمتد الغازات الناتجة عن الاحتراق في العنفة الغازية بشكل كظيم. بعد مغادرتها للعنفة الغازية تقدم الغازات جزءاً من حرارتها إلى مرجل استعادة الحرارة

الضائعة، وي طرح الجزء الباقي إلى الوسط الخارجي، وفي المخطط السابق أعطيت درجات الحرارة للعملية على سبيل المثال.



الشكل 2.8 : مخطط الدارة المركبة على المخطط T-s.

أما الشكل (3.8) فيبين مخطط تيار الحرارة لمخطط الدارة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.



الشكل 3.8 : مخطط تيار الحرارة لمخطط الدارة المركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار.

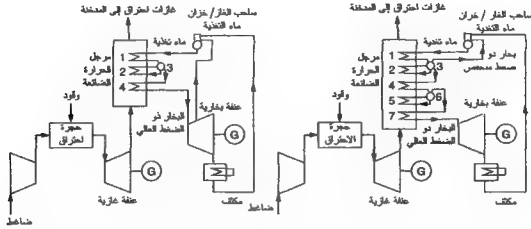
تتراوح درجة حرارة الغاز قبل العنفة الغازية في الوقت الحاضر بين 1100 و 1250 °C وبعدها تكون عادةً بين 550 و 600 °C. يمكن تبريد هذه الغازات في مرحلة استعادة الحرارة الضائعة حتى تصل درجة حرارتها إلى 100 °C. أخفض درجة حرارة لهذه المخططة المركبة تسود في مكثف العنفة البخارية، وهي تتراوح بين 25 و 30 °C. وكما هو واضح فإن مجال درجات الحرارة لعملية محطة الدارة المركبة يتحدد بين درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة التي تبلغ حوالي 1250 °C ودرجة حرارة المكثف التي تقع بين 25 و 30 °C. إن مبدأ رفع مردود (جودة) المنشأة هو رفع درجة الحرارة الوسطية لإضافة الحرارة وتخفيض درجة الحرارة الوسطية لطرح الحرارة، وهذا المبدأ يمكن تنفيذه في المحطة المركبة بطريقة مثلى، وبالتالي فإن محطات الدارة المركبة تمثل أعلى مردود بين جميع أنواع محطات توليد الطاقة.

تتباين محطات الدارة المركبة التي تعمل بدون إحراق إضافي لتوليد البخار وفقاً لدورة البخار فهناك:

- دورة البخار ذات الضغط الواحد
 - دورة البخار ذات الضغط الواحد مع مبخرات إضافية التفاضلية
 - دورة البخار ذات الضغطين
 - دورة البخار ذات الضغوط الثلاثة
- تتضمن المنشأة ذات الضغط الواحد لخط البخار والمبينة بشكل تخطيطي في الشكل (a4.8) ما يلي:

- جملة العنفة الغازية التي تتألف من ضاغط، حجرة احتراق، عنفة غازية مع مولد.
- مرحلة استعادة الحرارة الضائعة ذا التدوير الطبيعي للمولف من أسطوانة الفصل للماء عن البخار (3) والموفر (1a) والمبخر (2b) ومحمص البخار (4).
- جملة العنفة البخارية المولفة من العنفة البخارية (6) مع المولد (G) والمكثف (7) ومضخة البخار المتكاثف (8) وساحب الغاز / خزان ماء التغذية (4) ومضخة ماء التغذية (5).
- جملة العنفة البخارية (6) مع المولد (G) والمكثف (7) ومضخة البخار المتكاثف (8) وساحب الغاز / خزان ماء التغذية (4)، ومضخة ماء التغذية (5).
- ينجز البخار المحمص عملاً في العنفة البخارية. يُرسل البخار المشبع إلى خزان ماء التغذية إما من الأسطوانة (الحلقة) 2 أو من الأسطوانة (الحلقة) 3 بعد مروره على صمام ختق، وبهذا يجري تسخين أولي للماء التغذية.

في توصيلات البخار ذات الضغط الواحد لا تبرد الغازات المغادرة للعنفة بشكل كافٍ ويكون مردود دورة البخار صغيراً بسبب درجة الحرارة الوسطية المنخفضة لإضافة الحرارة. بخلاف دورة البخار التقليدية ذات المراحل المتعددة لعملية التسخين الأولي للماء فإن ماء التغذية هنا درجة حرارة منخفضة.



الشكل 4.8 : (a) محطة الدارة المركبة ذات الضغط الواحد لحظ البخار (b) محطة الدارة المركبة ذات الضغطين لحظ البخار.

(b)	(a)
1 موثر ذو ضغط منخفض	1 موثر (مسخن ماء أولي)
2 موثر ذو ضغط منخفض	2 موثر
3 أسطوانة (حلة) فصل ذات ضغط منخفض	3 أسطوانة (حلة) فصل الماء عن البخار
4 موثر ذو ضغط عالٍ	4 محمص بخار
5 موثر ذو ضغط عالٍ	
6 أسطوانة (حلة) فصل ذات ضغط عالٍ	
7 محمص بخار ذو ضغط عالٍ	

تُستخدم دورة البخار أحادية الضغط ذات البخارات الملتفة الإضافية على سبيل المثال لأنواع الوقود الرديئة (التي يحتويها من الكبريت عالٍ).

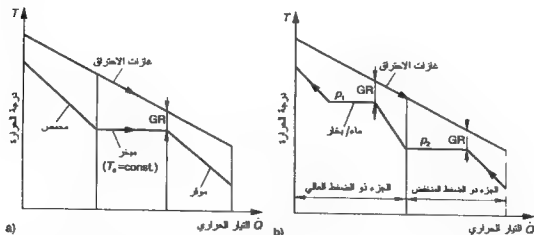
يتألف مرجل استعادة الحرارة الضائعة في محطات الدارة المركبة التي لدورة بخارها ضغطان (الشكل 4.8b) من جزء ذي ضغط منخفض (2) يحوي موفراً ومبخراً، وجزء ذي ضغط عالٍ يحوي موفراً ومبخراً ومحمصاً. يستخدم البخار المحمص الطازج المولد في الجزء عالي الضغط في العنفة البخارية. ويؤخذ في الجزء ذي الضغط المنخفض بخار مشبع يساق قسم منه إلى الجزء ذي الضغط المنخفض من العنفة البخارية ويمرر جزء آخر عبر صمام خنق (ليس مبيّناً على الرسم) إلى خزان ماء التغذية (ساحب الغازات).

يجري في المجرى ثنائي الضغط الضغوط تبخر على مرحلتين. يستعمل جزء من البخار القادم من مبخر الضغط المنخفض للتسخين الأولي لماء التغذية ويمدد الجزء الباقي في عتفة الضغط المنخفض، وتنخفض بذلك درجة حرارة الغازات المغادرة والضايعات الحرارية مع هذه الغازات، وبالتالي يرتفع المردود الإجمالي لمخطة الدارة المركبة.

أما المجرى الثلاثي الضغوط فهو يتألف من جزء يكون فيه ضغط البخار منخفضاً وآخر يكون فيه الضغط متوسطاً والثالث يكون فيه الضغط مرتفعاً، وهذه الطريقة يكون مردود عملية البخار أعلى منه في الطرق السابقة ولكنه الخيار الأعلى كلفة، لذلك يكون استخدام هذا الطريقة ذا مغزى في الحالات التي يُطلب فيها المردود الأكبر عندما تكون تكاليف الوقود مرتفعة.

يمكن كذلك تخمين المردود الإجمالي لمخطة الدارة المركبة عن طريق اللجوء إلى التخميص الوسطي وباستخدام ضغوط تفوق قيمتها الضغط الجوي في دورة البخار. إلا أن ذلك يؤدي إلى نشوء تكاليف إضافية.

يبين الشكل (5.8) تغيرات درجة الحرارة لغازات الاحتراق ولوسط العمل الذي هو ماء/بخار، وذلك في مرحل استعادة الحرارة الضائعة لمخطة دارة مركبة أحادية أو ثنائية الضغط في خط البخار بالنسبة للتيار الحراري Q . يبلغ التدرج (أي فرق درجات الحرارة الأصغري بين غازات الاحتراق ودرجة الإشباع للماء) 10 إلى 15 K.



الشكل 5.8 : تغيرات درجة الحرارة لغازات الاحتراق ولوسط العمل الذي هو ماء/بخار في مرحل استعادة الحرارة الضائعة (a) للمنشأة ذات الضغط الوحيد (b) للمنشأة ذات الضغطين.

المردود الإجمالي

ينتج المردود الإجمالي لمخطط دارة مركبة غازية وبخارية η_{CC} بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار كما يلي:

$$(1.8) \quad \eta_{CC} = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_S$$

حيث: P_{GT} استطاعة العنفة الغازية، P_{ST} استطاعة العنفة البخارية [MW]
 Q_S الاستطاعة الحرارية [MW]، التي تقدم في حجرة احتراق العنفة الغازية.
 بحسب للمردود الحراري لدورة عمل العنفة الغازية كما يلي:

$$(2.8) \quad \eta_{GT} = P_{GT} / Q_S$$

أما الاستطاعة الحرارية المطروحة من دورة عمل العنفة الغازية فهي:

$$(3.8) \quad Q_{GT,R} = Q_S - P_{GT} = Q_S (1 - \eta_{GT})$$

تُقدّم هذه الاستطاعة الحرارية إلى مرحل استعادة الحرارة الضائعة للاستفادة منها في دورة عمل العنفة البخارية ولذلك يصبح:

$$(4.8) \quad Q_{ST,S} = Q_S (1 - \eta_{GT})$$

وبالتالي فالمردود الحراري لدورة العنفة البخارية:

$$(5.8) \quad \eta_{ST} = P_{ST} / Q_{ST,S}$$

والاستطاعة المفيدة للعملية البخارية:

$$(6.8) \quad P_{ST} = \eta_{ST} Q_{ST,S} = \eta_{ST} Q_S (1 - \eta_{GT})$$

بتعويض قيمة P_{ST} من المعادلة (6.8) في المعادلة 1.8 يصبح:

$$(7.8) \quad \eta_{CC} = [P_{GT} + \eta_{ST} Q_S (1 - \eta_{GT})] / Q_S$$

وبالتالي يصبح:

$$(8.8) \quad \begin{aligned} \eta_{CC} &= \eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{GT}) \\ &= \eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT} \eta_{ST} \end{aligned}$$

حيث: η_{GT} المردود الحراري للعنفة الغازية و η_{ST} المردود الحراري للعنفة البخارية.
 تبين المعادلة (8.8) أن المردود الإجمالي لمخطط دارة مركبة ذات عنفة غازية وبخارية أكبر من مردود المنشأة ذات العنفة الغازية، ولكنه أصغر من مجموع مردودي المنشأة ذات العنفة الغازية

والمنشأة ذات العنفة البخارية. إن المردود العالي للعنفة الغازية هو شرط للوصول إلى مردود إجمالي عالٍ للمنشأة المشتركة.

يُدعى فرق درجات الحرارة الأصغري بين غازات الاحتراق والماء في مرحلة استعادة الحرارة الضائعة بـ "التدرج" (Gradient).

يبين الجدول (1.8) مقارنة بين محطات الدارة المركبة التي بها عنفتان غازيتان GT 13 E2 من صنع شركة ABB مع أنواع مختلفة من دورات العمل البخارية. المردود الإجمالي معطى بدلالة القيمة الحرارية الدنيا للغاز الطبيعي.

الجدول 1.8: مقارنة بين محطات الدارة المركبة ذات الأنواع المختلفة من دورات البخار (عند شروط ISO القياسية أي درجة الحرارة 0°C والضغط 1.013 bar وعند مستوى سطح البحر).

المردود الإجمالي [%]	الاستطاعة [MW]			دورة عمل البخار
	CC	ST	GT	
51.6	466.7	148.1	318.6	دورة عمل أحادية الضغط
45.2	490.6	172	318.6	دورة عمل ثنائية الضغط
55.0	497.8	179.2	318.6	دورة عمل ثلاثية الضغط
55.2	499.7	181.1	318.6	دورة عمل ثلاثية الضغط مع تحميص وسطي

يتضح من الجدول (1.8) أن مردود المنشأة المشتركة يمكن أن يرفع عن طريق أساليب متطورة لدورة عمل البخار (مثلاً من 51.6% للدورة أحادية الضغط حتى 55.2% للدورة ثلاثية الضغط مع تحميص وسطي).

مثال 1.8

ما هو المردود الإجمالي η_{CC} لمحطة دارة مركبة بدون إحراق وقود إضافي لتوليد البخار إذا كان المردود الحراري للعنفة الغازية $\eta_{ST} = 0.38$ وللعنفة البخارية $\eta_{ST} = 0.25$ ؟ ما هو استهلاك الوقود السائل في حجرة احتراق العنفة الغازية إذا كانت الاستطاعة الكهربائية للمحطة الكاملة $P_{el} = 350 \text{ MW}$ ؟ القيمة الحرارية الدنيا للوقود السائل الخفيف (المازوت) 42700 kJ/kg .

الحل

1. بمعرفة $\eta_{GT} = 0.38$ و $\eta_{ST} = 0.25$ يمكن حساب المردود الإجمالي بالاستعانة بالعلاقة (1.8) كما يلي:

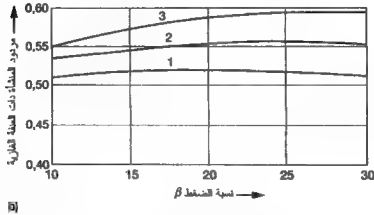
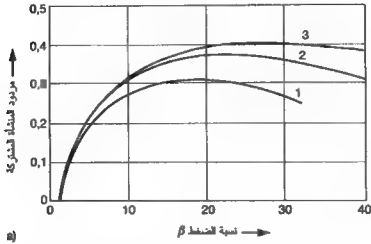
$$\eta_{CC} = \eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{GT})$$

$$= 0.38 + 0.25 (1 - 0.038) = 0.535$$

2. استهلاك الوقود السائل الخفيف (المازوت) الذي قيمته الحرارية الدنيا $LCV = 42700 \text{ kJ/kg}$ للمنشأة ذات الاستطاعة الكهربائية P_{el} هو:

$$m_F = P_{el} / \eta_{CC} \cdot LCV$$

$$= 350 \text{ MW} / 0.535 \times 42.7 \text{ MJ/kg} = 15.3 \text{ kg/s}$$



الشكل 6.8 : (a) مردود المنشأة ذات العنفة الغازية (b) مردود المنشأة المشتركة. درجة حرارة الغاز عند الدخول إلى العنفة الغازية: $3 = 1300^\circ\text{C}$, $2 = 1150^\circ\text{C}$, $1 = 1000^\circ\text{C}$. يتحدد المردود الإجمالي لمخطة الدارة المركبة بشكل رئيسي عن طريق مردود العنفة الغازية، والشكل (6.8) يبين مردود المنشأة ذات العنفة الغازية وكذلك مردود المنشأة الكاملة بدون إحراق

وقود إضافي لتوليد البخار وعلاقتها بنسبة الضغط ودرجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية. يتم الحصول على المردود الإجمالي الأعظمي لمحطة الدارة المركبة عند قيمة مثلى لنسبة الضغط.

2.8 محطة الدارة المركبة مع إحراق وقود إضافي لتوليد البخار

مخطط هذه المنشأة مبين على الشكل (b1.8) تتم عملية إضافة الحرارة (إدخال الحرارة) بحرق الوقود في حجرة الاحتراق للعنفة الغازية وبخلاف حجرة احتراق العنفة الغازية التي يستخدم فيها الغاز الطبيعي أو الوقود السائل الخفيف (للازوت) فإنه يجري حرق الفحم في فرن توليد البخار. تتألف الاستطاعة الحرارية الإجمالية المضافة (الداعلة) من مقدارين:

$$(9.8) \quad Q_S = Q_{CC} + Q_{AF}$$

حيث: Q_{CC} الاستطاعة الحرارية المضافة في حجرة احتراق العنفة الغازية

Q_{AF} الاستطاعة الحرارية المضافة في الفرن الإضافي لتوليد البخار.

وبالاستعانة بالنسبة:

$$(10.8) \quad f_{AF} = Q_{AF} / Q_{CC}$$

نحصل على الاستطاعة الحرارية الإجمالية المضافة كما يلي:

$$(11.8) \quad Q_S = Q_{CC} (1 - f_{AF})$$

والمردود الإجمالي لمحطة الدارة المركبة بفرن توليد البخار الإضافي:

$$(12.8) \quad \eta_{CC} = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_S = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_{CC} (1 + f_{AF})$$

المردود الحراري للعنفة الغازية:

$$(13.8) \quad \eta_{GT} = P_{GT} / Q_{CC}$$

والمردود الحراري للعنفة البخارية:

$$(14.8) \quad \eta_{ST} = P_{ST} / Q_{GT,R} + Q_{AF}$$

الاستطاعة الحرارية المطروحة من العنفة الغازية:

$$(15.8) \quad Q_{GT,R} = Q_{CC} (1 - \eta_{GT})$$

أما المردود الحراري للعنفة البخارية فيعطى بالعلاقة:

$$(16.8) \quad \eta_{ST} = P_{ST} / (Q_{GT,R} + Q_{AF})$$

$$= P_{ST} / Q_{CC} (1 - \eta_{GT} + f_{AF})$$

واستطاعة العنفة البخارية:

$$(17.8) \quad P_{ST} = \eta_{ST} Q_{CC} (1 - \eta_{GT} + f_{AF})$$

إذا عوضنا P_{ST} في المعادلة 12.8 نحصل على المردود الإجمالي للمحطة مع فرق توليد البخار الإضافي:

$$(18.8) \quad \eta_{CC} = [P_{GT} + \eta_{ST} Q_{CC} (1 - \eta_{GT} + f_{AF})] / Q_{CC} (1 - f_{AF})$$

أو:

$$(19.8) \quad \eta_{CC} = [(\eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{GT} + f_{AT})) / (1 + f_{AF})]$$

$$(20.8) \quad \eta_{CC} = [(\eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT} \eta_{ST} + f_{AF})] / (1 + f_{AF}) \quad \text{أو}$$

تتعلق قيمة η_{CC} بالدرجة الأولى بمردود العنفة الغازية، أما مردود عملية البخار والجزء الإضافي من الوقود الذي يحرق في فرن توليد البخار فهما عاملا تأثير مهمان.

يؤدي رفع f_{AF} إلى زيادة المردود الإجمالي η_{CC} فقط عندما لا يؤدي هذا إلى تناقص جوهري في η_{ST} . كلما ازدادت درجة حرارة دخول الغازات إلى العنفة الغازية، كلما قل تأثير f_{AF} على المردود الإجمالي. عند قيم صغيرة لـ f_{AF} وبالتالي عند درجة حرارة أقل للغازات الاحتراق بعد الفرن الإضافي لتوليد البخار f_3 (أدنى من 750 °C) يرتفع المردود الإجمالي عن طريق استخدام أفضل للحرارة المطروحة من العنفة الغازية. عند قيم أعلى لـ f_{AF} يتم الحصول على قيم لـ f_3 تفوق الـ 750 °C، وهذا يرتفع مردود دورة البخار، إلا أن المردود الإجمالي ينخفض.

الخلاصة

يتحدد المردود الإجمالي لمخطط الدارة المركبة بشكل رئيسي بمردود العنفة الغازية. إن محطات الدارة المركبة التي لا تحوي فرنًا إضافيًا لتوليد البخار أبسط وأرخص من المنشآت ذات إحراق الوقود الإضافي بقصد توليد البخار، كما أن مردودها أعلى، إلا أن المنشآت ذات إحراق الوقود الإضافي بقصد توليد البخار أكثر مرونة من ناحية اختيار نوع الوقود، لأنه من الممكن إحراق الوقود الصلب في الفرن الإضافي (ولا سيما الفحم) وليس الغاز الطبيعي كما يحرق في حجرة احتراق العنفة الغازية.

مثال 2.8

ما هو المردود الإجمالي وكمية الوقود السائل الخفيف اللازمة لمحطة دارة مركبة استطاعتها الكهربائية 350 MW؟

كمية الوقود المضافة إلى فرن توليد البخار الإضافي تعادل 40 % من كمية الوقود المضافة إلى حجرة احتراق مرجل استعادة الحرارة. مردود العنفة الغازية 38 % والبخارية 25 %، القيمة الحرارية الدنيا للوقود السائل (المازوت) 42700 kJ/kg. يُطلب إجراء مقارنة هذه النتيجة مع نتيجة محطة الدارة المركبة بدون إضافة وقود لتوليد البخار الواردة في المثال 1.8.

الحل

1. يحسب المردود الإجمالي للمحطة كما يلي:

$$\eta_{CC} = (\eta_{GT} + \eta_{ST} - \eta_{GT} \eta_{ST} + f_{AF} \eta_{ST}) / (1 + f_{AF})$$

$$= (0.38 + 0.25 - 0.38 \times 0.25 + 0.4 \times 0.25) / (1 + 0.4) = 0.544$$

2. الاستهلاك الإجمالي للوقود السائل الخفيف:

$$m_F = P_{el} / (\eta_{CC} LCV)$$

$$= 350 \text{ MW} / 0.544 \times 42.7 \text{ MJ/kg} = 18.05 \text{ kg/s}$$

بالمقارنة مع المنشأة بدون فرن توليد البخار فإن مردود محطة الدارة المركبة ذات الفرن لتوليد البخار أصغر وبالتالي فإن استهلاك الوقود أكبر.

مثال 3.8

تتألف محطة دارة مركبة من عنفة غازية استطاعتها الكهربائية 240 MW P_{GT} ومن مرجل استعادة (استرجاع) الحرارة الضائعة وعنفة بخارية استطاعتها الكهربائية 120 MW P_{ST} . تستخدم هذه المنشأة لتأمين الكهرباء والحرارة لمدينة، فإذا كانت مردود استخدام الطاقة لمحطة الطاقة 87 % η_{PS} ويستهلك في حجرة احتراق العنفة الغازية 12.9 kg/s m_F من الغاز الطبيعي قيمته الحرارية الدنيا 49 MJ/kg.

المطلوب تحديد:

— الاستطاعة الحرارية Q_H

— الرقم المميز للتيار σ في هذه المنشأة

- المردود الحراري للعتقة البخارية والغازية
- المردود الإجمالي الكهربائي للمنشأة
- درجة حرارة الغازات لدى مغادرتها لمرجل استعادة الحرارة الضائعة.
- لذلك تفرض القيم التالية:

$$A_{\min} = 17 \text{ kg/kg} \text{ للاحتراق}$$

$$\lambda = 2.4 \text{ عامل زيادة الهواء في حجرة احتراق العتقة الغازية}$$

$$C_{p,G} = 1.05 \text{ kJ/kg K} \text{ السعة الحرارية النوعية لغازات الاحتراق}$$

الحل

1. الطاقة المقدمة في الوقود إلى محطة الدارة المركبة:

$$Q_S = m_F \text{ LCV}$$

$$= 12.9 \text{ kg/s} \times 49 \text{ MJ/kg} = 632.1 \text{ MJ/s}$$

2. بما أن مردود استخدام الطاقة للمنشأة 0.87 فإن الاستطاعة الحرارية الممكن الاستفادة منها:

$$Q_H = \eta_{PS} Q_S - (P_{GT} + P_{ST})$$

$$= 0.87 \times 632.1 \text{ MJ/s} - (240 + 100) \text{ MW} = 209.93 \text{ MJ/s}$$

3. يُعطى الرقم المميز للتيار في هذه المنشأة المشتركة بالعلاقة:

$$\sigma = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_H$$

$$= (240 + 100) \text{ MW} / 209.93 \text{ MJ/s} = 1.62$$

4. المردود الحراري للعتقة الغازية:

$$\eta_{GT} = P_{GT} / Q_S$$

$$= 240 \text{ MW} / 632.1 \text{ MJ/s} = 0.38$$

5. الحرارة التي تحملها الغازات للمغادرة للعتقة الغازية:

$$Q_{R,GT} = Q_S - P_{GT}$$

$$= 632.1 \text{ MJ/s} - 240 = 392.1 \text{ MJ/s}$$

6. بما أن الحرارة المضافة إلى المنشأة البخارية $Q_{S,ST}$ مساوية للحرارة المحمولة مع غازات العتقة الغازية للمغادرة فإن المردود الحراري لمنشأة العتقة البخارية:

$$\eta_{ST} = P_{ST} / Q_{S,ST}$$

$$= 100 \text{ MW} / 392.1 \text{ MJ/s} = 0.255$$

7. المردود الكهربائي لمحطة الدارة المركبة:

$$\eta_{el} = \eta_{GT} + \eta_{ST} (1 - \eta_{GT})$$

$$= 0.38 + 0.255 (1 - 0.38) = 0.538$$

أو:

$$\eta_{el} = (P_{GT} + P_{ST}) / Q_S$$

$$= (240 + 100) \text{ MW} / 632.1 \text{ MJ/s} = 0.538$$

8. التدفق الكتلي للهواء ولفازات الاحتراق:

$$m_A = \lambda A_{\min} m_F = 2.4 \times 17 \text{ kg/kg} \times 12.9 \text{ kg/s} = 526.32 \text{ kg/s}$$

$$m_G = m_F + m_A = 12.9 + 526.32 = 539.22 \text{ kg/s}$$

9. الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق:

$$Q_{G,Loss} = Q_S (1 - \eta_{PS})$$

$$= 632.1 \text{ MJ/s} (1 - 0.87) = 82.17 \text{ MJ/s}$$

10. درجة حرارة غازات الاحتراق بعد مغادرتها لمرجل استعادة الحرارة الضائعة (عند مغادرة المنشأة بشكل كامل):

$$t_G = Q_{G,Loss} / m_G C_{PG}$$

$$= 82.17 \times 10^3 \text{ kJ/s} / 539.22 \text{ kg/s} \times 1.05 \text{ KJ/kg K} = 145^\circ\text{C}$$

يعطي الجدول (2.8) مواصفات أكبر محطات دارة مركبة في العالم.

حسب الوضع الراهن فإن مردود العنفات الغازية التي يتم تصنيعها يتراوح بين 35 و38.5%، ويمكن عن طريق محطات الدارة المركبة الحصول على مردود إجمالي يبلغ 55 حتى 58 % باستخدام الغاز الطبيعي والوقود السائل الخفيف (الملازوت).

تتراوح درجة حرارة دخول الغازات إلى العنف الغازية بين 1000 و1250 °C ودرجة حرارة الدخول إلى مرجل استعادة الحرارة الضائعة بين 610 و550 ودرجة حرارة الخروج منه 110 — 170 °C.

الجدول 2.8: عطلات الدارة المركبة (التي هي قيد العمل حتى عام 1995 أو قيد الإنشاء)

موقع المنشأة - البلد	الاستطاعة [MW]	الردود	عام الإنشاء
Bang Pakong — تايلاند	750	42	1980
Ambarli — تركيا	1350	52	1990
King's Lynn — بريطانيا	350	55.4	1996
Topada do Outeiro — البرتغال	990	—	1998

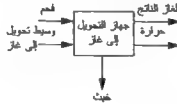
3.8 التواؤم مع استخدام الفحم الذي يتم تحويله إلى غاز (المغوَّز)

1.3.8 تحويل الفحم إلى غاز (التغويز)

عملية التحويل إلى غاز

! التغويز هو التحويل الكيميائي للفحم عن طريق وسيط إلى غاز قابل للاحتراق.

يمكن توضيح عملية التحويل إلى الغاز من حيث المبدأ كما يلي (الشكل 7.8).



الشكل 7.8 : مبدأ عمل تحويل الفحم إلى غاز.

فحم + وسيط تحويل إلى غاز + حرارة = وقود غازي + مخبث (رماد)

عند تسخين الفحم بمعزل عن الهواء تنطلق أولاً المركبات الطيارة (القابلة للتطاير) الموجودة في الفحم وذلك عند درجات الحرارة العالية (التفكك) ويتشكل فحم الكوك.

الفحم = فحم الكوك + الهيدروكربونات (C_mH_n)



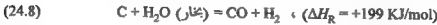
تُحوّل نواتج التفكك في جهاز التحويل إلى غاز بعد ذلك إلى غاز (نتائج عن الفحم).

إن عملية التحويل إلى الغاز عملية ماصة للحرارة (endothermic) ويمكن إنتاج كمية الحرارة اللازمة عن طريق احتراق جزء من الفحم مع الأكسجين داخل جهاز التحويل إلى غاز وذلك وفق التفاعل التالي للاحتراق الكامل أو الناقص:

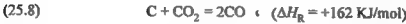


يستخدم لتحويل الفحم إلى غاز عادةً بخار الماء مع الأكسجين أو الهواء كوسيط تحويل إلى غاز. تتم في عملية التحويل إلى غاز عادة التفاعلات التالية:

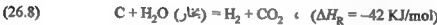
التفاعل غير المتجانس للماء (مادة صلبة/غاز):



تفاعل Boudouard غير المتجانس:



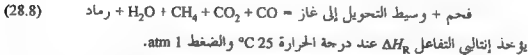
تفاعل الماء المتجانس (غاز/غاز):



تفاعل تشكيل الميثان المتجانس:



ويصف التفاعل التالي مجمل العملية:



يتعلق تركيب غاز الفحم بوسيط التحويل إلى غاز المستخدم وبدرجة الحرارة التي يجري عندها التحويل. يتم تنظيف الغاز الخام من الغبار باستخدام الهواء (كوسيط تحويل) يتم توليد غاز ذي محتوى عالٍ من (التتروجين) (الأزوت)، وباستخدام بخار الماء ينتج غاز الماء (Watergas) الذي يتألف بشكل رئيسي من الهيدروجين وأول أكسيد الكربون.

يبين الجدول (3.8) التركيب الوسيط والقيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج.

تُحسب القيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج LCV_G من تركيب الأجزاء التي يتألف منها وقيمها الحرارية الدنيا (CH_4 , H_2 , CO_2):

$$(29.8) \quad LCV_G = r_{CO} LCV_{CO} + r_{H_2} LCV_{H_2} + r_{CH_4} LCV_{CH_4}$$

حيث: r نسبة حجم المركبات CH_4 , H_2 , CO $[\text{m}^3/\text{m}^3]$

LCV القيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج (G) وللمركبات CH_4 , H_2 , CO $[\text{MJ}/\text{m}^3]$ حسب الحال.

الجدول 3.8: التركيب والقيمة الحرارية الدنيا للغاز الناتج ولغاز الماء (LCV_G)

غاز الماء	الغاز المولّد	مركبات الغاز
40	25	$[\%] \text{CO}$
50	15	$[\%] \text{H}_2$
5	8	$[\%] \text{CO}_2$
4	52	$[\%] \text{N}_2$
1	—	$[\%] \text{H}_2\text{O}$
12.6	5.04	$[\text{MJ}/\text{m}^3] LCV_G$

تصنف الغازات التي تفوق قيمتها الحرارية الدنيا $12.5 \text{ MJ}/\text{m}^3$ بأنها غازات قوية وإلا تعتبر غازات ضعيفة.

مردود التحويل إلى غاز هو النسبة بين طاقة الارتباط الكيميائي للغاز الناتج إلى الحرارة المضافة مع الوقود.

$$\eta_{Ga} = LCV_G V_G / LCV \quad (30.8)$$

حيث: LCV_G القيمة الحرارية الدنيا للغاز (المولّد) $[\text{MJ}/\text{m}^3]$

V_G حجم الغاز الناتج $[\text{m}^3/\text{kg}]$. متر مكعب لكل كغ وقود

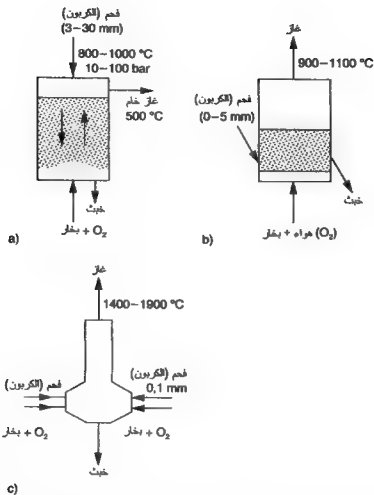
LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود $[\text{MJ}/\text{kg}]$.

درجة تحويل الغاز هي النسبة بين محتوى الغاز الناتج من الكربون وبين محتوى كمية الكربون المرسلة إلى جهاز التفوير:

$$\eta_C = \text{محتوى الغاز الناتج من الكربون} / \text{كمية الكربون الصافية المرسلة إلى جهاز التفوير} \quad (31.8)$$

2.3.8 جهاز التحويل إلى غاز (التفوير)

هناك ثلاث طرائق سائدة عملياً: طريقة الطبقة الثابتة، طريقة الطبقة الدوامة، طريقة التيار الطيار (الشكل 8.8).



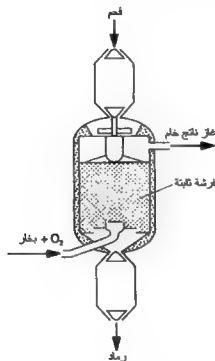
الشكل 8.8 : طرائق التحويل إلى غاز (a) جهاز التحويل ذو الطبقة الثابتة (b) جهاز التحويل ذو الطبقة الدوامة (c) جهاز التحويل ذو التيار الطيار.

محول الغاز ذو الطبقة الثابتة

تستخدم في هذه الطريقة غالباً محولات Lurgi ذات الضغط (الشكل 9.8). يجري توزيع الكربون ذي الحبيبات التي يتراوح قطرها بين 3 و 30 mm بشكل متساوٍ من الأعلى على الفرشة الثابتة. يستخدم الأوكسجين وبخار الماء كوسيط تحويل. يجري في المواقع المختلفة من المفاعل تخفيف وتحويل إلى غاز وجزئياً احتراق للكربون.

تسود درجة الحرارة القصوى (تحت درجة حرارة ذوبان الرماد) في منطقة الاحتراق فوق الشبكة وبجوارها. يتساعد الغاز الناتج ذو المحتوى المرتفع من الميثان ماراً عبر الفرشة، ويتبرد أثناء

ذلك حتى درجة الحرارة 300 أو 650 °C. يُفصل كلٌّ من الغبار والهيدروكربونات القابلة للتكاثف من غاز الكربون. شروط التشغيل هي كما يلي: الضغط 10 حتى 100 bar، درجة الحرارة 800 حتى 1000 °C (تحت درجة حرارة تليّن الرماد). يصل إنتاج محولات الغاز من نوع Lurgi إلى 1 t/h. هذا وقد تم تطوير محول غاز ذي طبقة ثابتة مع سحب للرماد وهو بالحالة المائعة من قبل شركة الغاز البريطانية British Gas/Lurgi.

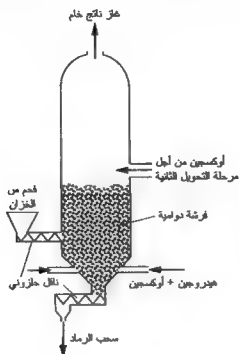


الشكل 9.8 : مخطط محوّل غاز من نوع Lurgi ذي طبقة ثابتة.

محول الغاز ذو الطبقة الدوامة

يمكن تحويل الكربون الذي يتراوح قطر حبيباته بين 1 و 5 mm عند الضغط الجوي ودرجة الحرارة 800 إلى 1000 °C إلى غاز في محول غاز ذي طبقة دوامية من نوع Winkler باستخدام الأوكسجين والبخار عند درجة حرارة أدنى من درجة تليّن الرماد. يبين الشكل (10.8) مخطط مولد الغاز من نوع Winkler. تمتاز هذه الطريقة ببساطة المعالجة الأولية لوقود الكربون وانخفاض استهلاك الأوكسجين والتشغيل الجيد عبر مجالات واسعة للاستطاعة. ترتفع في محوّل Winkler ذي درجة الحرارة العالية الاستطاعة النوعية للمحوّل (الكسب في الغاز ومردود التحويل إلى غاز)

وذلك جراء الضغط العالي (10 إلى 25 bar) ودرجة الحرارة المرتفعة (1000 حتى 1600 °C). ترتفع درجة تحويل الكربون حتى 99% عن طريق استرجاع الرماد المحمول مع الغاز الخام.



الشكل 10.8 : محوّل غاز ذي طبقة دوامية من نوع Winkler.

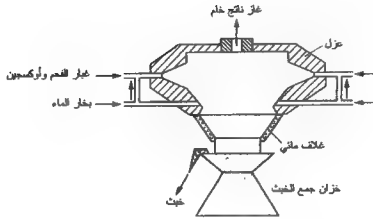
جهاز التحويل ذو التيار الطيار

يتعرض في هذا الجهاز (الشكل 11.8) الكربون للمطحون الناعم الذي يبلغ قطر حبيباته mm 0.1 لوسيط التحويل الذي هو الأوكسجين وبخار الماء، ويجري التحويل إلى غاز في غيمة غبار طيارة عند درجة حرارة تصل إلى 1900 °C وضغط يتراوح بين 25 و 40bar. يتكثّل الجزء الأكبر من الرماد الذائب ويتم سحبه من أسفل الجهاز، أما الرماد الطيار فيتم تنظيف الغاز الناتج منه. هناك الطرائق الصناعية التالية التي تستخدم التيار الطيار: PRENFLO، TEXACO، SHELL ... إلخ. في طريقة TEXACO يطحن الكربون بالحالة الرطبة ويضاف على شكل عجينة مشبعة بالماء من أعلى جهاز تحويل الغاز، وتجري عملية التحويل إلى غاز عند ضغوط تصل إلى 80 bar، وتكون درجة الحرارة محدود 1400 °C، وذلك في غيمة من الغبار الطيار. يتم التخلص من الحثب السائل عن طريق حقنه بالماء وتبريده ثم سحبه.

مقارنة طرائق التحويل إلى غاز

أهم القيم المميزة لطريقة تحويل إلى غاز هي:

- كمية الغاز التي يتم كسبها [كغ لكل كغ وقود]
- الاستهلاك من وسيط التحويل إلى غاز [كغ لكل كغ وقود]
- تركيب الغاز الناتج.
- القيمة الحرارية للغاز الناتج.
- درجة تحويل الكربون.
- المردود الحراري لعملية التحويل إلى غاز.



الشكل 11.8 : مخطط محوّل غاز تيار طيار.

الجدول 4.8: الغاز المكتسب وكمية الوسيط اللازمة للتحويل إلى غاز [kg لكل kg فحم].

الطريقة الثابتة	الطريقة الدوامية	التيار الطيار
2.13	5.3	2.15
كمية الغاز الناتجة عن عملية التحويل إلى غاز [kg/kg]		
0.71	—	1.07
كمية الأوكسجين اللازم لعملية التحويل [kg/kg]		
—	3.75	—
كمية الهواء اللازمة لعملية التحويل [kg/kg]		
0.48	0.61	0.14
كمية البخار اللازمة لعملية التحويل [kg/kg]		

تبين الجدول من (4.8) إلى (6.8) القيم المميزة لمختلف طرائق التحويل إلى غاز (جهاز التحويل ذو الطبقة الثابتة، ذو الطبقة الدوامية، ذو التيار الطيار). القيم الموضوعة هي بالنسبة لكربون رديء

تركيبه العنصري (كسبة وزنية) كما يلي: $C = 80.1$ ، $H = 3.5$ ، $O = 2.2$ ، $N = 1.3$ ، $S = 1.2$ ، الرماد 6.7، الماء 5. القيمة الحرارية الدنيا لهذا الفحم 31 MJ/kg. الوسيط المستخدم في عملية التحويل إلى غاز هو الأوكسجين/ بخار الماء في كل من جهاز التحويل ذي الطبقة الثابتة وذو التيار الطيار، أما في جهاز التحويل ذي الطبقة الدوامة فإن الوسيط هو الهواء/بخار الماء. الجدول 5.8: التركيب [%] والقيمة الحرارية للغاز الجاف.

المركبات	الطبقة الثابتة	الطبقة الدوامة	التيار الطيار
CO	21	18	55
H ₂	39	21	34
CH ₄	10	1	—
N ₂	2	51	1
CO ₂	28	9	10
القيمة الحرارية [MJ/m ₃]	10.5	4.9	10.7

الجدول 6.8 مردود عملية التحويل إلى غاز η_{Ga} ، درجة تحول الفحم $\eta_{th,Ga}$ ، المردود الحراري لمختلف عمليات التحويل إلى غاز $\eta_{th,Ga}$

	الطبقة الثابتة	الطبقة الدوامة	التيار الطيار
η_{Ga}	89	73	79
η_c	99	95	99
$\eta_{th,Ga}$	94	92	95

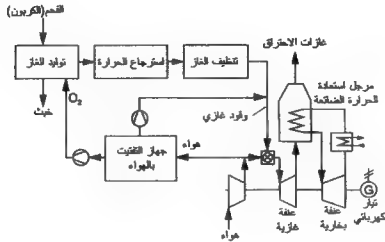
3.3.3 محطات الدارة المركبة مع استئصال الغاز الناتج عن تحويل الكربون

إلى غاز

المعطيات التفصيلية للمنشأة

- يبين الشكل (12.8) شكلاً مبسطاً لمحطة دارة مركبة لتوليد الطاقة تستخدم الكربون التحوّل إلى غاز وهي تتضمن ثلاثة أجزاء رئيسية:
- جهاز تحويل الكربون إلى غاز مع معدات لتنقية الغاز والتفتيت بالهواء
 - منشأة ذات عنفة غازية ومرجل لاستعادة الحرارة الضائعة
 - منشأة ذات عنفة بخارية.

كان من المفترض أن تبدأ في عام 1996* المحطة التحريية KoBra التي تستخدم الفحم البني باستطاعة كهربائية قدرها 367 KW بإحراق فحم الكوك المتبقي في مرجل ذي فرشاة دوامية. يُمكن مبدأ KoBra من تحقيق مردود يزيد عن مردود للمنشآت التقليدية بحدود 30 إلى 45 % (صافي).



الشكل 12.8 : مخطط عمل الدارة المركبة التي تستخدم عملية تحويل الكربون إلى غاز.

كذلك سينخفض انبعاث SO_2 ، NO_x والغبار بشكل واضح. ويجري التخطيط لوحدة KoBra استطاعتها 700 إلى 1000 MW. تتألف هذه المنشأة من الأجزاء التالية:

- بحفف كربون ذو طبقة دوامية.
- جهاز تحويل الكربون إلى غاز من النوع Winkler الذي يعمل عند درجة حرارة مرتفعة وله طبقة دوامية.
- الدارة المركبة التي تحوي عنفة غازية ومرجل استعادة الحرارة الضائعة وعنفة بخارية.

يبين الجدول (7.8) معلومات تفصيلية عن المنشأة التحريية KoBra.

يسخن الكربون البني الخام الذي محتواه من الماء 40 إلى 60 % في مسخن أولي حتى درجة الحرارة 65 °C ثم يضاف إلى الجفف الذي يعمل عند درجة الحرارة 110 °C والذي يحوي طبقة دوامية، ويجري تجفيفه بحيث تصبح نسبة الماء المتبقي فيه 12 %. تقدم الطاقة اللازمة للتجفيف على شكل بخار يُمرر في مبادلات حرارية غاطسة.

* قبل عام من تأليف الكتاب (لترجم).

الجدول 7.8: مواصفات المنشأة التحريية KoBra.

القيمة	التسمية
367	1. الاستطاعة الإجمالية [MW]
45	2. المردود الكهربائي [%]
فحم بني (كربون بني)	3. الوقود
18.6/9.9	— القيمة الحرارية للتحم الحام أو الفحم الجاف [MJ/kg]
748	4. التدفق الحراري مع الوقود [MJ/s]
	5. التحويل إلى غاز بطريقة Winkler ذات درجة الحرارة العالية
160	— تدفق الفحم [t/h]
90.5	— تدفق الهواء اللازم لجهاز التحويل إلى غاز [kg/s]
140	— تدفق الغاز الحام الناتج (الرطب) [kg/s]
91	— درجة تحويل الفحم [%]
72	— مردود الغاز البارد [%]
4.2	— القيمة الحرارية للغاز الناتج [MJ/kg]
	6. تبريد الغاز الحام الناتج
330/128	(a) بخار ذو ضغط عالٍ — ضغطه [bar]، درجة حرارته [°C]
90	التدفق [kg/s]
246/37	(b) بخار ذو ضغط متوسط — ضغطه [bar]، درجة حرارته [°C]
15	التدفق [kg/s]
	7. العنفة البخارية (شركة MAN)
155	— الاستطاعة [MW]
	— البخار الطازج
103/520/110	ضغطه [bar] درجة الحرارة [°C] تدفقه [kg/s]
	— التجميعي الوسطي
116/520/29	ضغطه [bar] درجة الحرارة [°C] التدفق [kg/s]
	— بخار الاستنزاف
440/17 (من 8.5 إلى 50)	ضغطه [bar] درجة الحرارة [°C] التدفق [kg/s]
0.05	8. ضغط المكثف [bar]
	9. العنفة الغازية (Siemens V94.3)
212	— استطاعتها [MW]
611/39/562	— التدفق الكلي [kg/s] — الهواء/ الوقود الغازي/ غازات الاحتراق
16	— نسبة الضغط في المضاط
550/1120	— درجة حرارة الغازات لدى دخولها إلى العنفة — عند خروجها [°C]

يُحوّل الكربون البني المحفّف في جهاز التحويل إلى غاز ذي الطبقة الدوامية من نوع Winkler. ينقل الوقود إلى جهاز التحويل إلى غاز عن طريق جملة محمات خاصة بواسطة ناقل حلزوني أو أنبوب مائل. يؤخذ هواء التحويل إلى غاز من ضاغط العنفة الغازية عند الضغط النهائي، وبعد رفع ضغطه حتى 30 bar ليستخدم كوسيط تحويل إلى غاز. يصل مردود تحويل الكربون إلى 91%. يُفصل الغبار من الغاز الخام الناتج في فرازة ساخنة، ويضاف إلى الطبقة الدوامية عن طريق أنبوب هابط. أما النواتج السفلية (التي تتألف من وقود غير مُحوّل والرماد) فيتم إخراجها عبر جملة خاصة. يتم تخليص الوقود الغازي قبل استخدامه للعنفة الغازية من الهيدروكربونات الثقيلة ومن روابط الكبريت.

تُرفع استطاعة المجموعة (غازي + بخاري) عن طريق ترطيب الوقود الغازي المُنقى، ويؤدي هذا إلى تخفيض تشكل NO_x في حجرة احتراق العنفة الغازية. يسخن الغاز النظيف أخيراً بواسطة بخار متوسط الضغط حتى درجة الحرارة $220^\circ C$ قبل إرساله إلى حجرة احتراق العنفة الغازية وإحراقه. العنفة مصممة بحيث تكون درجة الحرارة عند الدخول إليها $1160^\circ C$. تستخدم حرارة الغازات المغادرة للعنفة بدرجة حرارة $550^\circ C$ في مرحلة استعادة الحرارة الضائعة لتوليد البخار. يتألف هذا المرحل من مسخن أولي للبخار (الماء) المتكاثف وموفر (مسخن أولي للماء) ذي ضغط متوسط وآخر ذي ضغط عالٍ ومبخر ذي ضغط متوسط وآخر ذي ضغط عالٍ وعمص وسطي. يُحمص البخار المشبع القادم من مبرد الغاز الخام والذي يكون ضغطه عالياً أو متوسطاً في مرحلة استعادة الحرارة الضائعة. العنفة البخارية التي تسحب البخار المتكاثف (MAN) ذات صناديق ثلاثة لثلاثة أجزاء ذات ضغط عالٍ ومتوسط ومنخفض ذي مجريين.

تتألف مجموعة (كتلة) العنفة من عنفة غازية رباعية المراحل (صنع شركة Siemens) من النوع V 94.3 (50 Hz، MW 220) وضغط ذي 17 مرحلة نسبة انضغاطه تساوي 16 وحجرتي احتراق أفقيتين تحويان على حراقات ذات انبعاث قليل لغازات NO_x (Low NO_x - Burners).

منشأة ELCOGAS

تركب في Puertollano (إسبانيا) محطة دارة مركبة من نوع حديث يتم فيها تحويل الفحم إلى غاز. الاستطاعة الكهربائية القائمة (Brutto) لهذه المنشأة هي MW 335 والصافية (Net) MW 300.

* تاريخ تأليف الكتاب عام 1997 (المترجم).

تستخدم فيها عنفة غازية Siemens من النوع V 94.3، درجة حرارة دخول الغاز إليها 1120 °C. واستطاعتها MW 200، كذلك توجد عنفة بخارية استطاعة خرجها MW 138.

في جهاز تحويل الفحم إلى غاز الذي أنتجته شركة Krupp-Koppers يستخدم 180000 m³/h من الغاز الذي قيمته الحرارية الدنيا 10.6 MJ/m³ وهو مستخرج من مزيج وقود (يتألف من 50% فحم و 50% فحم كوك من النفط -Petrol-Coke). يُستخدم هنا مولد بخار ذو تدوير قسري وانضغاط في ثلاث مراحل للاستفادة من حرارة غازات العنفة الغازية في توليد البخار . مواصفات البخار: ضغط البخار الطازج 115 bar ودرجة حرارته 508 °C، التخميص الوسطي عند 29 bar و 517 °C، ضغط المكثف 0.07 bar.

يصل المردود الصافي للمنشأة إلى 45 %. تنخفض هنا عملية انبعاث الغازات الضارة بحيث يصبح انبعاث SO₂ أقل من 10 mg/m³ وانبعاث NO_x حتى 60 mg/m³.

9 محطات التوليد المشترك للكهرباء

والحرارة*

1.9 الأرقام المميزة لمحطات التوليد المشترك للكهرباء وللحرارة

محطة التوليد المشترك للكهرباء وللحرارة

تقوم هذه المحطات بنفس الوقت بتأمين الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى الطاقة الحرارية اللازمة للاستعمالات الصناعية أو التدفئة.

تدعى المحطات الكبيرة التي تقوم بتأمين الطاقة الكلية (تيار كهربائي وحرارة تسخين) للمنشآت الصناعية أو للمدن بمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء المركزية، أما المجموعات الصغيرة التي تؤمن الطاقة (كهرباء + حرارة) لمجموعة من الأبنية السكنية أو المصانع أو المكاتب أو لمشاريع أخرى فتدعى بمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية.

لمحطة التوليد المشترك مزية الوفرة الكبير في الطاقة الأولية، إذا ما قورنت بمحطات التوليد الكهرباء البخارية التقليدية (مع مكثف) أو بمحطات التدفئة أو بالمرجل (الغلايات) المستقلة.

الرقم المميز للتيار الكهربائي

من أجل تقييم محطة التوليد المشترك للكهرباء والحرارة من ناحية استهلاكها للطاقة هناك رقمان ميزان: الرقم المميز للتيار الكهربائي σ وعامل استهلاك الوقود β .

يُعرف الرقم المميز للتيار في محطة توليد مشترك للكهرباء والحرارة σ بأنه النسبة بين الاستطاعة الكهربائية للمحطة واستطاعتها الحرارية.

$$(1.9) \quad \sigma = P_{el} / Q_H$$

في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات عنفات سحب البخار وتكثيفه تنتج الاستطاعة الكهربائية كمجموع للمقادير الناتجة عن تمدد البخار في مراحل العنفة المختلفة، أي:

$$(2.9) \quad P_{el} = \sum m_{vi} \Delta h_{vi} \eta_m \eta_G$$

حيث: m_{vi} التدفق الكتلي للبخار في المرحلة i من العنفة

Δh_{vi} الهبوط الحقيقي للإنتالي في المرحلة i من العنفة

η_m المردود الميكانيكي لمجموعة العنفة

η_G مردود المولدة الكهربائية.

تُحسب الاستطاعة الحرارية Q_H لمخطة التدفئة وتوليد الكهرباء كما يلي:

$$(3.9) \quad Q_H = m_{HV} (h_{HV} - H_{Hc}) = m_{HW} (h_{HWext} - h_{HWext}) \quad [kW]$$

حيث: m_{HV} التدفق الكتلي لبخار التسخين في المكثف $[kg/s]$

m_{HW} التدفق الكتلي لماء التسخين $[kg/s]$

h_{HV} الإنتالي النوعي لبخار التسخين $[kg/kg]$ قبل مكثف التسخين (التدفئة)

h_{Hc} الإنتالي النوعي لبخار التسخين بعد مكثف التسخين $[kg/kg]$

h_{HWext} و h_{HWext} الإنتالي النوعي لماء التسخين قبل وبعد مكثف التسخين $[kJ/kg]$.

في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء التي تحوي عنفة ذات ضغط خلقي فإن الرقم المميز للتيار σ معيار مهم لتقدير جودة تنفيذ العملية. كذلك لـ σ أهمية خاصة في محطات الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه.

عامل استهلاك الوقود

يُعرف عامل استهلاك الوقود كما يلي:

$$(4.9) \quad \beta = (Q_{F,TPS} - Q_{F,con}) / Q_H$$

حيث: $Q_{F,TPS}$ الحرارة المحمولة مع الوقود المستهلك في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء $[Kw]$

$Q_{F,con}$ الحرارة المحمولة مع الوقود المستهلك في محطة الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه $[kW]$.

والاستهلاك الحراري مع الوقود [kJ/s] محطة الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه:

$$(5.9) \quad Q_{F,con} = m_{F,con} LCV$$

والاستهلاك الحراري مع الوقود [kJ/s] محطة الطاقة الحرارية والكهربائية (thermal power station)

$$(6.9) \quad Q_{F,TPS} = m_{F,TPS} LCV$$

حيث: $m_{F,con}$ استهلاك الوقود في المحطة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه [kg/s]

$m_{F,TPS}$ استهلاك الوقود في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء [kg/s]

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود [kJ/kg].

كذلك يمكننا كتابة:

$$(7.9) \quad Q_{F,con} = P_{el} / \eta_{con}$$

$$(8.9) \quad Q_{F,TPS} = (Q_H + P_{el}) / \eta_{TPS} = Q_H (1 + \sigma) / \eta_{TPS} \quad \text{كذلك}$$

حيث: η_{con} و η_{TPS} مردود محطة الطاقة الكهربائية ذات سحب البخار وتكثيفه ومردود محطة التدفئة وتوليد الكهرباء.

المردود الإجمالي لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء

تتألف الاستطاعة المفيدة الجاهزة للاستعمال من الطاقة الكهربائية P_{el} والاستطاعة الحرارية Q_H . تقدم درجة الاستفادة من الطاقة في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء فكرة عن الجزء المفيد من الاستطاعة ($P_{el} + Q_H$) الذي يأتي مع الوقود المستخدم أي $Q_{F,TPS}$.

$$(9.9) \quad \eta_{TPS} = (P_{el} + Q_H) / Q_{F,TPS}$$

المردود الكهربائي لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء.

$$(10.9) \quad \eta_{el} = P_{el} / Q_{F,TPS}$$

مراعاة المردود الحراري لدورة العمل (η_m) ومردود مولد البخار (η_{SG}) والمردود الداخلي للتعنف البخارية (η_{IT}) والمردود الكهربائي — الميكانيكي للمولدة (η_G) والاستهلاك الذاتي لمحطة الطاقة η_{is} ينتج المردود الكهربائي.

$$(11.9) \quad \eta_{el} = \eta_{SG} \eta_m \eta_{IT} \eta_G$$

ولحساب المردود الحراري لعملية تحول الحرارة في محطة الطاقة البخارية تطبق العلاقة التالية:

$$(12.9) \quad \eta_{th} = W_u / Q_S$$

$$\text{أو:} \quad \eta_{th} = (h_v - h_{ev}) / (h_v - h_{fw})$$

حيث: W_u العمل المفيد للعنفة [J]

Q_S كمية الحرارة المضافة [J]

h_v, h_{ev}, h_{fw} الانتالبي النوعي لـ البخار الطازج، البخار المنفصل (بعد العنفة)، ماء التغذية (عند مدخل المرجل) [kJ/kg].

مردود مولد البخار:

$$(13.9) \quad \eta_{SG} = Q_{SG} / Q_F$$

حيث: Q_{SG} الاستطاعة الحرارية المفيدة لمولد البخار [W]

Q_F الحرارة المضافة مع الوقود عند إحراقه في مولد البخار [W].

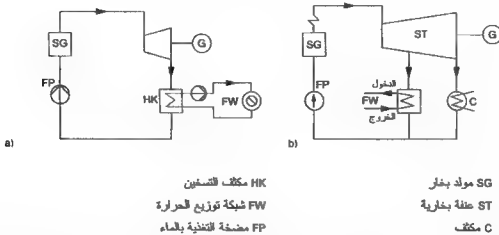
2.9 محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الضغط المقابل وذات سحب البخار وتكثيفه

يُستخدم في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء نوعان من العنفات البخارية: ذات الضغط المقابل (Back Pressure) والعنفات البخارية ذات سحب البخار وتكثيفه (extracting and condensing) للاستفادة من حرارته. !

يختلف هذان النوعان بالدرجة الأولى من ناحية ضغط البخار عند مخرج العنفة. في النوع الثاني من المحطات يغادر البخار المنفصل عنفة التكثيف عند ضغط تخلخل يبلغ 0.04 إلى 0.06 bar، ويمر في مكثف، وهناك يفقد حرارته ويعطىها إلى ماء التبريد، مما يؤدي إلى تكاثفه. تبلغ درجة حرارة ماء التبريد 25 إلى 35 °C، والحرارة المطروحة من المكثف لا يمكن الاستفادة منها ثانية. إلا أنه يمكن الحصول على حرارة عن طريق سحب البخار من عنفة التكاثف عند ضغط معين.

في العنفة البخارية ذات الضغط المقابل (الخلفي) يتم رفع ضغط البخار عند مغزج العنفة حتى قيم تتناسب مع درجات الحرارة اللازمة للمستهلك، ويكون الضغط عادة أكبر من 1 bar. إذا أريد استخدام محطة تدفئة وتوليد كهرباء لتأمين الحرارة من أجل عمليات تكنولوجية (تقنية) في منشأة صناعية فإن ضغط الخروج من عنفة الضغط المقابل يتحدد وفقاً لضغط البخار اللازم للعملية التقنية.

يجب أن تكون درجة حرارة البخار المنفلت من العنفة في المحطات المستخدمة لتدفئة المدن مرتفعة بحيث يمكن إيصال ماء التسخين إلى درجة الحرارة المطلوبة في مجموعة التدفئة. النموذجان الرئيسيان لمحطات التدفئة وتوليد الكهرباء مبينان على الشكل (1.9).

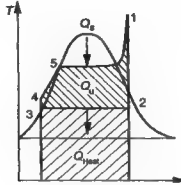


الشكل 1.9 : مبدأ وصل محطة التدفئة وتوليد البخار (a) ذات عنفة التكاثف التي تعمل عند ضغط خلفي (مقابل) (b) ذات سحب البخار وتكثيفه للاستفادة من حرارته.

يبين الشكل (2.9) بشكل مبسط دورة عمل محطة تدفئة وتوليد كهرباء ذات ضغط خلفي على المخطط T-s. يغادر البخار المنفلت العنفة البخارية عند ضغط مرتفع (أعلى من 1 bar) وتستخدم حرارة تكاثفه لتوليد طاقة حرارية. يكون انخفاض الانتالي للبخار ضمن العنفة وكذلك الاستطاعة الكهربائية للمحطة الحرارية ذات الضغط الخلفي أقل منهما في حالة المنشأة ذات سحب البخار وتكثيفه للاستفادة من حرارته.

للمساحة الموجودة داخل دورة العمل على المخطط T-s تعبر عن الحرارة المفيدة Q_u المساوية للعمل المفيد في دورة العمل W_u . أما المساحة أسفل الخط 2-3 في المخطط T-s فهي حرارة

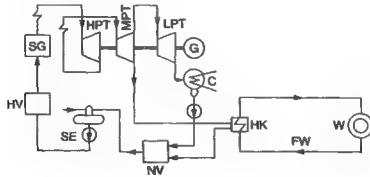
التسخين الممكن الاستفادة منها نظرياً $Q_{heat,th}$ ، والمساحة تحت الخط 1-4 تمثل الحرارة المضافة لدورة العمل Q_s . إن حرارة التسخين الممكن الاستفادة منها فعلياً Q_{heat} أقل من $Q_{heat,th}$ النظرية.



الشكل 2.9 : دورة عمل المحطة الحرارية ذات الضغط الخلفي على المخطط T-s.

في المحطات ذات الضغط الخلفي فإن تقدم الطاقة الكهربائية والحرارية مترابط بشكل كبير، وهذه المحطات لا تستخدم إلا في المنشآت الصناعية.

يتم سحب حرارة التدفئة (التسخين) في أكثر الأحيان باستخدام العنفات ذات سحب البخار وتكثيفه (الشكل 3.9).

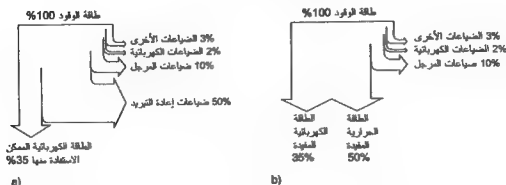


HPT	عتلة الضغط العالي	SG	مولد بخار ذو محوسر وسطي
LPT	عتلة الضغط المنخفض	MPT	عتلة الضغط المتوسط
HK	مكثف للتسخين	C	مكثف
W	مستهلك حرارة	FW	شبكة توزيع الحرارة
HV	مسخن أولي للماء ضغطه مرتفع	NV	مسخن أولي للماء ذو ضغط منخفض
		SE	خزان ماء تغذية مع مضخة

الشكل 3.9 : سحب الطاقة الحرارية (حرارة التسخين) من عتلة سحب البخار وتكثيفه.

يتراوح مردود المحطات الكهربائية التي تحوي عنفة تكاثف بين 36 و 43 %، أما المحطات ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة فيصل فيها مردود استخدام الطاقة $\eta_{\text{cog}} = 0.8$ حتى 0.85.

ويبين الشكل (4.9) مخطط توزيع الطاقة النمطي لكلا النوعين.



1.9 مثال

من أجل مجموعة بعنفة ذات ضغط خلفي معلوم ما يلي:

مواصفات البخار الطازج قبل العنفة: $p_1 = 100 \text{ bar}$, $t_1 = 550^\circ\text{C}$, الضغط المقابل $p_2 = 3 \text{ bar}$
 تدفق البخار الكتلي: $m = 50 \text{ kg/s}$, المردود الداخلي للعنفة $\eta_T = 0.9$ ومردود المولد الكهربائي $\eta_G = 0.98$

— بالاستعانة الكهربائية للمجموعة،

— المردود الكهربائي،

— الرقم المميز للتيار،

— عند دخل الاستفادة من الطاقة حطة التوليد المشترك للحرارة والكهرباء إذا كانت الضياعات

الحرارية عند المستهلك 20 % $\eta_{\text{LOS}} =$

الحل:

1. بالاستعانة بمخطط $h-s$ نحدد:

اتتالي البخار الطازج عند $p_1 = 100 \text{ bar}$ و $t_1 = 550^\circ\text{C}$ $h_1 = 3500 \text{ kJ/kg}$

اتتالي البخار المنفصل من العنفة عند تمدد ايزنتروبي للبخار من p_1 إلى p_2 $h_{2s} = 2630 \text{ kJ/kg}$

2. الانتالي الفعلي للبخار المنفلت عند تمدد غير عكوس:

$$h_2 = h_1 - \eta_T (h_1 - h_{2s})$$

$$= 3500 - 0.9 (3500 - 2630) = 2717 \text{ kJ/kg}$$

3. انتالي ماء تغذية المرحل عند p_2 (من الجدول A.5):

$$h_{FW} = 584.27 \text{ kJ/kg}$$

4. العمل النوعي الفعلي للنفقة (هبوط الإنتالي في النفقة):

$$w_T = h_1 - h_2 = 3500 - 2717 = 783 \text{ kJ/kg}$$

5. كمية الحرارة المضافة لكل 1 kg بخار:

$$q_s = h_1 - h_{FW} = 3500 - 584.27 = 2915.73 \text{ kJ/kg}$$

6. المردود الحراري الفعلي:

$$\eta_{th} = w_T / Q_s = 783 / 2915.73 = 0.269$$

7. المردود الكهربائي:

$$\eta_{el} = \eta_{th} \eta_G = 0.269 \times 0.98 = 0.263$$

8. الاستطاعة الكهربائية:

$$P_{el} = m w_T \eta_G$$

$$= 50 \text{ kg/s} \times 783 \text{ kJ/kg} \times 0.98 = 38367 \text{ kW}$$

9. الاستطاعة الحرارية المفيدة:

$$Q_u = m (h_2 - h_{FW}) (1 - \eta_{LOS})$$

$$= 50 \text{ kg/s} (2717 - 584.27) (1 - 0.2) = 85309.2 \text{ kW}$$

10. الرقم المميز للتيار

$$\sigma = P_{el} / Q_u = 38367 / 85309.2 = 0.45$$

11. درجة الاستفادة من الطاقة لمحطة التوليد المشترك للحرارة والكهرباء

$$\eta_{total} = P_{el} + Q_u / m q_s$$

$$= (38367 + 85309.2) / 50 \times 2915.73 = 0.848$$

3.9 تصميم محطة التدفئة وتوليد الكهرباء

بناء على الاستطاعة الحرارية الأعظمية (استطاعة التدفئة) Q_{H1} للنفقة البخارية يتم اختيار مواصفات البخار الطراز ودرجة حرارة التخميص الوسطي عند تصميم محطة التدفئة وتوليد الكهرباء وفقاً للجدول (1.9).

الجدول 1.9: اختيار مواصفات البخار لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء.

استطاعة التسخين الحرارية	مواصفات البخار	مواصفات التخميص الوسطي
Q_H (MW)	p [bar] t [°C]	t_{RH} [°C]
50	485-520	60-80
100	520-535	80-125
150	535	125-165
200-250	535-540	165-185
300-600	450-550	185-250

يؤرّ ارتفاع أسعار الوقود اللحوء إلى استخدام قيم مرتفعة للبخار الطازج، فالمواصفات المنخفضة للبخار الطازج يرافقها انخفاض كمية التيار المنتج وكذلك تكاليف الاستثمار. وبحسب مواصفات البخار الطازج يتم اختيار المسخنات الأولية لماء التسخين.

ومنصف على سبيل المثال تفاصيل محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Reuter West في برلين. والشكل (5.9) يبين هذا المحطة بشكل تخطيطي. أجزاؤها الأساسية هي: مولد البخار 1 مع معدات تنظيف غازات الاحتراق (جهاز سحب الآزوت a 1، المصفاة الكهربائية b 1، جهاز غسل غازات الاحتراق وسحب الكبريت منها c 1)، المدخنة d 1، مجموعة العنفة التي يسحب البخار منها (ذات الضغط العالي والمتوسط والمنخفض 2 - 2 b) مع المولد 3، جملة إعادة التبريد مع برج التبريد 4، المكثف 5، المسخنات الأولية لماء التغذية (خزان ماء التغذية/ساحب الغازات 7)، جملة نقل الحرارة 9-13.

أهم المواصفات الفنية لهذه المحطة الحرارية هي:

الاستطاعة الكهربائية الصافية الأعظمية للمحطة 600 MW. الاستطاعة الحرارية الأعظمية للتسخين 774 MW وعند ذلك تبلغ الاستطاعة الكهربائية 249 MW $\times 2$.

1. مولد البخار: هناك مولدان يحوي كل منهما مجرى ونصف للغازات من النوع دي الجريان القسري والأحادي للماء في المنشأة من النوع Benson الذي يحوي مضخة تدوير عند الحملات الصغيرة (حمولة المرجل (الفلاية) يمكن تخفيضها حتى 20 % من الاستطاعة الاسمية وتكون عادة حتى 35 %).

البخار الطازج: الاستطاعة الاسمية لتوليد البخار 961 t/h، الضغط 196 bar، درجة الحرارة 540 °C.

التحميص الرطبي البسيط: كمية البخار 1817 t/h ، الضغط 49 bar ، درجة الحرارة 540°C

درجة حرارة دخول ماء التغذية 293°C ، مردود المولد 92% .

2. الاحتراق: الوقود هو الفحم الحجري، خليط الفحم الحجري والفحم البني ($75\% / 25\%$)، وقود سائل ثقيل (فيول أويل)، [حتى 40% من الاستطاعة الاسمية للمرجل (الغلاية)]. تدفق الوقود 102 t/h منها 76 t/h فحم حجري و 26 t/h فحم بني. كذلك يحرق الفحم المطحون (غبار الفحم): احتراق ثنائي المراحل، هناك 16 حرقاً ذا مراحل من النوع الذي تتبع فيه غازات NO_x بكميات قليلة ($\text{Low NO}_x \text{ Burners}$)، الحركة في الحراقات دوامية وتجري إضافة الهواء إلى الحراقات عبر توصيلات منفصلة ولها فوهات (فالات) هواء إضافية. يتم التخلص من الرماد وهو في الحالة الجافة. مقدار تشكّل NO_x عند الاحتراق أقل من 650 mg لكل m^3 من غازات الاحتراق.

3. معدات طحن الفحم: هناك 4 مطاحن ذات أحواض تحوي أسطوانات، استطاعة الطحن لكل منها 28 t/h . تخدم كل مطحنة 4 حراقات.

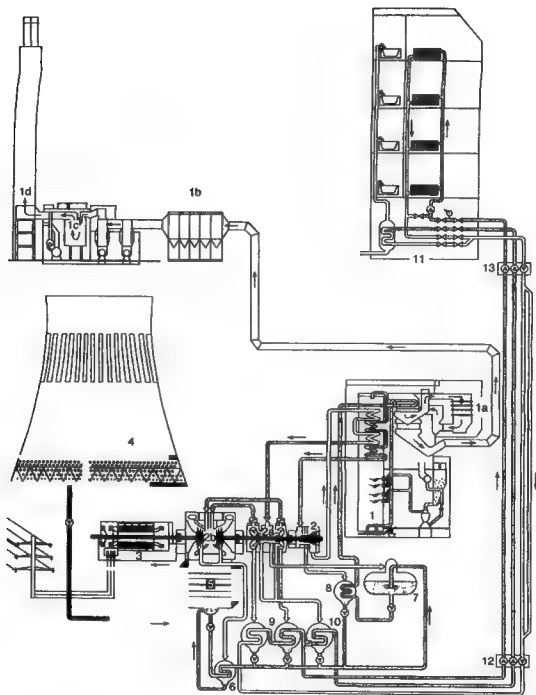
4. العنفات، المولدات، المحولات: هناك عنفتان، كل منهما ذات ثلاثة صناديق يسحب منها البخار لتكثيفه والاستفادة من حرارته. تعمل هذه العنفات مع تحميص وسطي بسيط، هناك عنفة أحادية الفيض ذات ضغط عالٍ (قسم الضغط العالي) وعنفتان كل منهما ثنائية الفيض إحداهما متوسطة الضغط والأخرى منخفضة الضغط.

استطاعة الوحدة (unit) الأعظمية 300 MW ، سرعة الدوران 3000 min^{-1} .

المولد ثنائي الأقطاب استطاعته الاسمية 353 MVA (التوتر — الجهد الاسمي 22 kV) ويتم تبريده بالمهيدروجين. المحول مرتبط مباشرة مع المولد (بلوك) باستطاعة اسمية 330 MVA ، طرف التوتر (الجهد) العالي: 400 kV .

5. مكثفات التسخين: هناك اثنان لكل عنفة، استطاعة التسخين الأعظمية $2 \times 387 \text{ MW}$.

6. جملة التغذية بالماء وإعادة التبريد: يتم تسخين ماء التغذية في المسخنات $6-8$ حتى درجة الحرارة 293°C . يجري في خزان ماء التغذية 7 سحب الغازات من ماء التغذية. برج التبريد من النوع الرطب ذي السحب الطبيعي (ارتفاعه حوالي 100 m ، قطر التضايق والقطر الأساسي $105/61 \text{ m}$) باستطاعة تبريد قدرها 700 MW ، وتدفع تيار الماء $23000 \text{ m}^3/\text{h} \times 2$ ، درجة حرارة الماء الساخن والبارد $32.1 / 19^\circ\text{C}$.



الشكل 5.9 : مخطط وصل المحطة Reuter West (في برلين) ذات عنفة سحب البخار وتكثيفه (2) ومولد البخار (1)

تؤخذ الحرارة من عنفة الضغط المتوسط عمر مكثفي تسخين 9 ومبادل حراري 10. وهكذا ترفع درجة حرارة ماء التسخين حتى 110 °C. تُركَّب مضخات تدوير في مركز التدفئة البعيد 12 وفي محطة الضخ 13. يتم التوزيع عن طريق محطة مبادلة 11. قطر قناة أنابيب توزيع ونقل ماء التسخين 4.1 m.

محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Reuter West (في برلين) مجهزة بأجهزة لتقليل إصدار الغبار والحبيبات، وتتألف معدات تنقية غازات الاحتراق لكل وحدة من جهاز سحب الآزوت a 1، مصفاة كهربائية b 1 وجهاز لسحب الكبريت من غازات الاحتراق c 1.

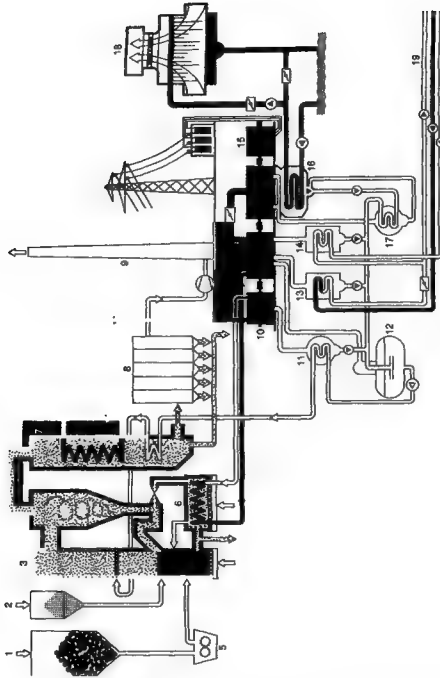
يتم سحب الآزوت من غازات الاحتراق عن طريق منشأة أفقية من النوع (Selective SCR Catalytic Reduction) ذات مجريين طويلين يشكل كل منهما جملة تحفيز 25 x 3.

تتوضع الحفازات بين الموفر (مسخن الماء الأولي) ومسخن الهواء الأولي على طريق غازات الاحتراق. بالإضافة الأمونياك كوسيط تخفيض لتواجد الآزوت في الغازات يتم فصل أكاسيد الآزوت إلى آزوت وماء. وقد تم وصف هذه الطريقة في الفصل السادس ووسيط التخفيض هو NH_3 . درجة حرارة التشغيل تتراوح بين 330 و 437 °C ويصبح محتوى غازات الاحتراق من NO_x بعدئذ أقل من 200 mg/m^3 .

أما درجة سحب الغبار في المصفاة الكهربائية فتبلغ 99.7 %.

المادة المستخدمة للامتزاز (adsorption) في منشأة سحب الكبريت من الغازات هي الحجر الكلسي والمادة الناتجة هي الجص. تبلغ درجة سحب الكبريت 85 %، أما محتوى الغاز التنظيف الأعظمي من SO_2 فهو بحدود 400 mg/m^3 . يقسم الغاز الذي سحب الغبار منه إلى جزئين، أحدهما يمر في غاسل متساوي الاتجاه ومتعاكس الاتجاه.

يتم رش مزيج معلق (Suspension) من الحجر الكلسي (المحلول بالماء) فينشأ مزيج معلق جديد هو الجص، الذي يتألف من أوكسيد الكبريت والحجر الكلسي، يُطرح من مستنقع الفصل عن طريق مضخات خاصة ثم تتم تصفيته وسحب الماء منه بحيث تبقى نسبة الرطوبة فيه 10 % بواسطة فرازات بالطرد المركزي (Centrifuge). التدفقات الكتلية الوسطية هي مسحوق الحجر الكلسي (كالطحين) 4050 kg/h ، حمض النمل 22 kg/h ، الجص 6200 kg/h ، المياه المستهلكة (المالحة) $9.5 \text{ m}^3/\text{h}$.



الشكل 6.9 : مخطط محطة التلخيف وتوليد الكهرباء Moabit في برلين ذات الفرشة الدوامية الاسترجاعية.
 1 صومعة فحم، 2 صومعة الحجر الكلسي، 3 حجرة احتراق، 4 فُرزة لسترجاع، 5 منشأة تكسير، 6 ميلل حراري دولسي،
 7 مطوح تسخين إضافي، 8 مصفاة غبار، 9 مخزنة، 10 عتلة، 11 مسخن أولي ذو ضغط عال، 12 خزان ماء للتغذية
 للمرجل، 13 جهاز تلمين ماء ساخن، 14 مكثف تسخين، 15 مولد كهربائي، 16 مكثف رئيسي، 17 مسخن أولي ذو ضغط
 منخفض، 18 برج تبريد، 19 أنابيب نقل الحرارة (شبكة التوزيع)

يُسخّن الغاز النظيف في حجرة احتراق تحرق الوقود السائل ثم تساق إلى المدخنة. تتألف منشأة السمدخنة في المحطة الحرارية Reuter West (برلين) من أنبوبين فولاذيين لتصريف الغازات (القطر 4.75 m، الارتفاع 122 m) في محور إسمنتي (قطره 13 m، ارتفاعه 104 m).

لمحطات التدفئة وتوليد الكهرباء في نفس الوقت مقارنة بالمحطات الكهربائية ذوات عنفات التكاثف المزايا التالية: يبلغ المردود الكهربائي عند توليد التيار الكهربائي فقط في المحطات الكهربائية ذوات عنفات التكاثف 38 % والضياعات مع ماء التبريد 54 % والضياعات مع غازات الاحتراق 8 % من الطاقة الحرارية القادمة مع تيار الوقود. أما عند توليد الحرارة والتيار الكهربائي في نفس الوقت في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء فيبلغ المردود الكهربائي 31 % ولكن هناك ربماً في الطاقة المفيدة عن طريق حرارة التسخين مقلده 49 %، فالمردود الإجمالي يصل إلى 80 %. تبلغ الضياعات الحرارية 20 % (مع ماء التبريد 12 % ومع غازات الاحتراق 8 %) وبهذا تُوفّر طاقة أولية ويقلّ انبعاث الغازات الضارة.

محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ذات مولدات البخار الدوامة (fluidized bed)

تعمل محطة Moabit في برلين منذ عام 1991، وهي محطة تدفئة وتوليد للكهرباء مزودة بفرشة وقود دوامة دوارة (استرجاعية). تتألف وحدة التوليد (unit) التي استطاعتها الحرارية MW 240 من مرحل بنسون ذي الانسياب الوحيد والقسري للماء في الدورة، ومن عنفة بخارية ومولد. يتضمن مولد البخار فرشة وقود دوامة استرجاعية (مقطعها 7.5 m × 7.5 m وارتفاعها 32 m) وفرازين (سلكون) ومبرداً ذا سير نقال وسطوح تسخين أخرى (محمصاً، محمصاً، سطياً، موفراً، مسخن هواء أولي). يبلغ التحمل السطحي لحجرة الاحتراق الدوامة 4.3 MW/m² والتحميل الحجمي لها 0.13 MW/m³. سطوح تسخين المبخّر على شكل أنابيب جدارية مبردة بالماء (ممرانية أو غشائية) وكذلك الأمر للمعد وللفراترين. يسخن الماء تسخيناً أولياً حتى درجة الحرارة 300 °C. يبين الشكل (6.9) مخطط عمل محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الطبقة الدوامة Moabit. يضاف إلى حجرة الاحتراق خليط من 39 % فحم حمري و 44 % فحم بني و 13 % رماد طيار و 4 % ححر كلسي. تبلغ القيمة الحرارية الوسطية للخليط MJ/kg 24.4.

يتعرض الهواء للتسخين الأولي في مسخن مُركّب خلف المصفاة الكهربائية، ويضاف الهواء الأولي والثانوي وكذلك الوقود والحجر الكلسي والرماد المسترجع من الفرازات والمبردات إلى

النصف السفلي من حجرة الاحتراق. يُرسل الهواء الأولي بسرعة 7 m/s فوق الأرضية المثقبة وتصل نسبة إتمام الاحتراق للفحم إلى ما يزيد على 99 %.

تُفصل المواد الصلبة من غازات الاحتراق عن طريق فارتين موصولتين على التوازي (القطر 7.3 m الطول الإجمالي 15 m). يجري سحب الغبار من غازات الاحتراق في المصفاة الكهربائية عند درجة الحرارة 320 °C. تبلغ الانبعاثات القيم التالية (بوحدة mg في الـ m³ عند الشروط النظامية): المحتوى من الغبار 20، SO₂: 200، NO₂: 200، CO: 250.

كما يمكن في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء استخدام مولدات بخار ذات فرشاة دوامية مضغوطة، وهي تتمتع بالمزايا التالية: بناؤها المدمج (Compact) وعامل انتقالها الحراري المرتفع واكتمال احتراق الوقود ودرجة سحب الكبريت المرتفعة ومحتوى غازات الاحتراق المنخفض من NO_x، أما مساوئها فهي انخفاض مردود العملية. تتم عملية الضغط في هذه الطريقة بواسطة ضاغط وحيد المرحلة، وعنفه غازية، حيث يرتفع الضغط إلى 6 bar ويستفاد من حرارة الغازات في توليد البخار وقد بينت الحسابات تحسناً في مردود العملية بحملها.

4.9 مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية

1.4.9 مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية التي تستخدم محركات

الاحتراق الداخلي

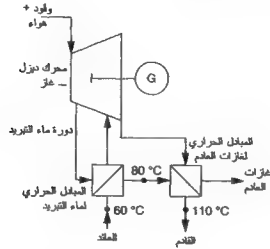
مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية هي محطة توليد طاقة تقوم بالإنتاج المشترك للكهرباء والحرارة لتأمين متطلبات محلية (لا مركزية). تستخدم في هذه المحطات محركات الاحتراق الداخلي أو العنفات الغازية من أجل التوليد المتزامن (بنفس الوقت) للتيار الكهربائي والحرارة (ربما المبردة أيضاً).

تتحول في المجموعات التي تعتمد على محركات الاحتراق الداخلي الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود الغازي أو السائل إلى طاقة حرارية وميكانيكية مفيدة.

ومبدأ هذه المجموعة مبين في الشكل (7.9).

وتستخدم لهذا الغرض محركات الديزل أو المحركات الغازية أو محركات الديزل — الغاز.

تتألف المجموعة ذات المحرك من جملة محرك — مولد ومبادلين حراريين أو ثلاثة لاستغلال حرارة غازات الاحتراق (العادم). تتراوح الاستطاعة الكهربائية للمجموعة ذات المحرك P_e بين 40 kW و MW 8 والاستطاعة الحرارية Q_H بين 80 kW و MW 9. يبلغ مردود الاستفادة من الطاقة 75 حتى 90 %.



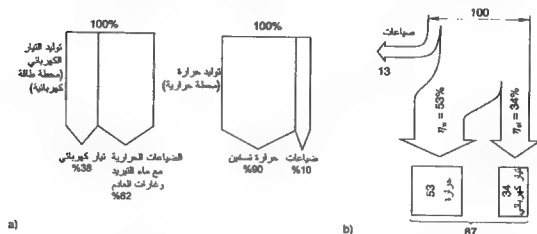
الشكل 7.9 : مبدأ عمل مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء التي تستخدم محرك الاحتراق الداخلي.

يُستخدم في هذه المجموعات الغاز الطبيعي، وقود الديزل (الملازوت)، غاز المولدات، غاز فحم الكوك، غاز شبكة المدينة بالإضافة إلى الغاز المستخرج من مطامر القمامة أو محطات معالجة مياه المجاري، كما يستخدم الوقود السائل الخفيف أو الثقيل. وخلافاً لمحطات الطاقة البخارية التي تولد كهرباء بمردود 38 % فإن المجموعات التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي يصل تحويل الطاقة الأولية فيها إلى تيار كهربائي وحرارة إلى القيمة 90 %، منها 30 % طاقة كهربائية و60 % حرارة قابلة للاستخدام، وبالتالي فإن استخدام مثل هذه المجموعات يساهم في توفير الطاقة وحماية البيئة. تُحوّل الحرارة الضائعة مع غازات احتراق المحرك وكذلك مع ماء التبريد أو زيت التشحيم إلى حرارة مفيدة لماء التسخين.

تُعرف نسبة الاستطاعة الكهربائية P_e إلى الاستطاعة الحرارية Q_H بـ "الرقم المميز للتيار الكهربائي"، ووفقاً للوقود المستخدم وتصميم جملة المحرك — المولد فإن قيمة η يمكن أن تصل حتى 1.

على سبيل المثال يتراوح استهلاك الطاقة الأولية (غاز طبيعي قيمته الحرارية الدنيا LCV حوالي 33 MJ/m^3) بين 148 و 392 kJ/s وذلك في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات الاستطاعة الكهربائية $P_{\text{هـ}}$ المتروحة بين 45 و 115 kW وذات الاستطاعة الحرارية المتروحة بين 85 و 210 kW. وتبلغ درجة الاستفادة من الطاقة حوالي 90%.

يبين الشكل (8.9) مقارنة بين عملية التوليد المشترك للتيار الكهربائي وحرارة التسخين (التدفئة) في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء وبين التوليد المنفصل للطاقة الكهربائية (في محطة الطاقة الكهربائية) والطاقة الحرارية (في محطة طاقة حرارية).
من أجل توفير الحرارة بشكل مضمون لبعض المشاريع (الأبنية السكنية، أبنية المعامل والمكاتب، المشافي، المسابح) يضاف مرجل ليعمل عند حولة الذروة، يحرق الغاز أو الوقود السائل.



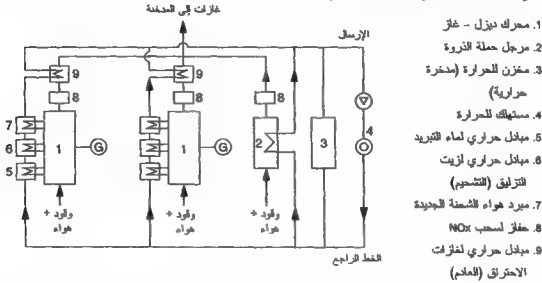
الشكل 8.9 : عتط Sankey (إضافة الحرارة وتحويلها) لـ: (a) توليد منفصل للتيار الكهربائي في محطة الطاقة البخارية (توليد الكهرباء) وحرارة التسخين في محطة التدفئة (التسخين) (b) التوليد المشترك للكهرباء وللحرارة في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء.

يؤدي استخدام محرك يعمل على وقودين (غاز — ديزل) وحرار يحرق وقودين لمرجل حولة الذروة إلى رفع جاهزية واقتصادية المنشأة بمحملها. تُعرف الجاهزية بأنها قابلية المنشأة لتوليد الطاقة، وتميزها القيم التالية: الجاهزية الزمنية وجاهزية الاستطاعة والجاهزية للعمل. الجاهزية الزمنية مثلاً هي النسبة بين مجموع أزمدة التشغيل مع أزمدة الجاهزية وبين الزمن الكلي للفترة المعتبرة أما

الجاهزية للعمل فهي نسبة العمل المتاح (أي الفرق بين العمل الاسمي والعمل غير المتاح) إلى العمل الاسمي.

يبين الشكل (9.9) مخطط التسلسل في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء المولدة من مجموعتي محرك مولد مع المبادلات الحرارية الموافقة بالإضافة إلى مرجل حمولة الذروة.

يجري توزيع الحرارة على المستهلكين المختلفين عن طريق محطة توزيع الحرارة المجهزة بمضخات تدوير في الشبكة وموزعات باتجاه التيار (المرسلات) ومجمعات التيار العائد والعدادات الحرارية، بالإضافة إلى أجهزة التحكم. تنظم درجة حرارة الإرسال وفقاً لدرجة حرارة الوسط الخارجي (الحرارة المحيطية). تستخدم في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء المولدات المتوافقة (المتزامنة) أو غير المتزامنة (Synchronous, asynchronous).



الشكل 9.9 : تسلسل العمليات في مجموعة التدفئة والتسخين ذات مجموعتي المحرك - المولد ومرجل حمولة الذروة.

2.4.9 كفاءة (فعالية) محركات الاحتراق الداخلي في مجموعات التدفئة وتوليد الكهرباء

دورة عمل المحرك الغازي (محرك البنزين)

تتألف دورة عمل محركات الاحتراق الداخلي من انضغاط ايزنتروبي وإضافة للحرارة بشيوت الحجم أو الضغط، و تمدد ايزنتروبي وطرح للحرارة بشيوت الحجم. يعتمد الهواء وسيط العمل

لعمليات المقارنة بين محركات الاحتراق الداخلي، كما يعتبر غازاً مثالياً بأس الايزنتروبي قدره $k = 1.4$ وثابت الغاز له $R = 0.287 \text{ kJ/kg K}$. السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم $c_v = 0.718 \text{ kJ/kg K}$ وبثبوت الضغط $c_p = 1.005 \text{ kJ/kg K}$.

عملية المقارنة المناسبة للمحركات الغازية هي دورة أوتو (Otto)، التي تتألف من:

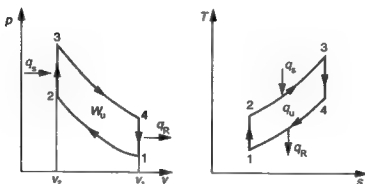
— انضغاط ايزنتروبي 1-2 يستهلك عملاً،

— إضافة للحرارة بثبوت الحجم 2-3،

— تمدد ايزنتروبي 3-4 يقدم عملاً،

— طرح للحرارة بثبوت الحجم 4-1.

وبين الشكل (10.9) دورة أوتو في مخططي p, v و T, s .



الشكل 10.9 : دورة عمل أوتو على المخططين $p-v$ و $T-s$.

تتميز دورة العمل بنسبة الانضغاط

$$(14.9) \quad \varepsilon = v_1 / v_2$$

العلاقة بين القيم المميزة للحالة (الحجم النوعي v ، الضغط p ، درجة الحرارة T) لوسيط العمل

الذي هو الهواء وذلك في دورة عمل أوتو مبينة في الجدول (2.9).

تحتسب كميات الحرارة لدورة أوتو من العلاقات التالية.

من أجل الحرارة المضافة بثبوت الحجم ($v = \text{const}$):

$$(15.9) \quad Q_s = m c_v (T_3 - T_2) \quad [\text{kJ}]$$

حيث: c_v يبلغ 0.718 kJ/kg K وهي السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم للهواء.

الجدول 2.9: العلاقات بين التقيم المميزة للحالة v , p , T في دورة عمل أوتو (Otto).

تغير الحالة	v	p	T
انضغاط ايزنتروبي 1-2 ($s = \text{const}$)	$v_2 = v_1 / \varepsilon$	$p_2 / p_1 = \varepsilon^k$	$T_2 / T_1 = \varepsilon^{(k-1)} = (p_2 / p_1)^{(k-1)/k}$
إضافة الحرارة بثبوت الحجم 2-3 ($v = \text{const}$)	$v_3 = v_2$	$p = R T / V$	$T_3 / T_2 = p_3 / p_2$
تمدد ايزنتروبي 3-4 ($s = \text{const}$)	$v_4 = v_1$	$p_4 / p_3 = 1 / \varepsilon^k$	$T_4 / T_3 = 1 / \varepsilon^{(k-1)} = (p_4 / p_3)^{(k-1)/k}$
طرح الحرارة بثبوت الحجم 1-4 ($v = \text{const}$)	$v_4 = v_1$	$p_4 / p_1 = T_4 / T_1$	

ومن أجل الحرارة المطروحة (عند $v = \text{const}$):

$$(16.9) \quad Q_R = m c_v (T_4 - T_1) \quad [\text{kJ}]$$

ينتج عمل الانضغاط بين p_1 و p_2 [kPa] من أجل أس ايزنتروبي $k = 1.4$ كما يلي:

$$(17.9) \quad W_{\text{comp}} = (p_2 V_2 - p_1 V_1) / (k - 1) \\ = m R (T_2 - T_1) / (k - 1) \quad [\text{kJ}]$$

ينتج عمل التمدد بين p_3 و p_4 [kPa] كما يلي:

$$(18.9) \quad W_{\text{exp}} = (p_3 V_3 - p_4 V_4) / (k - 1) \\ = m R (T_3 - T_4) / (k - 1) \quad [\text{kJ}]$$

ويصبح العمل المفيد للدورة العمل:

$$(19.9) \quad W_u = W_{\text{exp}} - W_{\text{comp}} = Q_S - Q_R \quad [\text{kJ}]$$

والمردود الحراري للدورة عمل أوتو:

$$(20.9) \quad \eta_{\text{th}} = W_u / Q_S = 1 - Q_R / Q_S = 1 - 1 / \varepsilon^{k-1}$$

كلما ارتفعت نسبة الانضغاط ε كلما ازداد المردود الحراري η_{th} (الجدول 3.9).

الجدول 3.9: المردود الحراري η_{th} للدورة عمل أوتو وعلاقته بنسبة الانضغاط ε وأُس الايزنتروبي $k = 1.4$.

نسبة الانضغاط ε	3	6	9	12
المردود الحراري η_{th}	0.36	0.51	0.58	0.63

دورة عمل محرك الديزل Diesel

عملية المقارنة المستخدمة لمركات الديزل هي دورة عمل "ديزل" التي تتألف من:

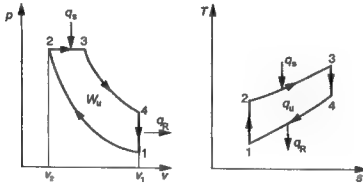
- انضغاط ايزنتروبي 1-2 يستهلك عملاً،
- إضافة للحرارة بثبوت الضغط 2-3،
- تمدد ايزنتروبي 3-4 يقدم عملاً،
- طرح للحرارة بثبوت الحجم 4-1.

يبين الشكل (11.9) دورة عمل ديزل على المخططين $T-s$ و $p-v$

تتميز دورة ديزل بنسبة الانضغاط ϵ ونسبة الحقن ϕ :

$$(21.9) \quad \phi = v_3 / v_2 \quad \text{و} \quad \epsilon = v_1 / v_2$$

يُضغَطُّ الهواء (وليس خليط الهواء والوقود كما هو الحال في دورة أوتو)، وتكون نسبة الانضغاط ϵ أكبر بكثير منها في دورة أوتو.



الشكل 11.9 : دورة عمل ديزل على المخططين $p-v$ و $T-s$.

تنطبق المعادلتان (16.9) و (17.9) للمستخدمتان في دورة أوتو أيضاً على دورة ديزل في حساب

الحرارة المطروحة Q_R أو عمل الانضغاط W_{comp} .

تُحسب الحرارة المضافة (عند $p = \text{const}$) في دورة ديزل كما يلي:

$$(22.9) \quad Q_S = m c_p (T_3 - T_2) \quad [\text{kJ}]$$

حيث: $c_p = 1.005 \text{ kJ/kgK}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للهواء.

أما عمل التمدد في دورة ديزل فيحسب كما يلي:

$$(23.9) \quad \begin{aligned} W_{\text{exp}} &= p_2 (v_3 - v_2) + (p_3 v_3 - p_4 v_4) / (k - 1) \\ &= m R [(T_3 - T_2) + (T_3 - T_4)] / (k - 1) \quad [\text{kJ}] \end{aligned}$$

حيث: p_2 و p_3 و p_4 بالـ [kPa]

k أس الايزتروبي وقيمته 1.4

المردود الحراري للدورة عمل ديزل:

$$(24.9) \quad \eta_{th} = W_u / Q_s = 1 - Q_R / Q_s = 1 - (\varphi^k - 1) / k(\varphi - 1) \varepsilon^{k-1}$$

يزداد المردود الحراري η_{th} للدورة عمل ديزل مع ازدياد نسبة الانضغاط ε وانخفاض نسبة الحفن φ .

وبازدياد الحمولة تزداد قيمة φ . يبين الجدول (4.9) تأثير φ على المردود الحراري η_{th} للدورة ديزل.

الجدول 4.9: المردود الحراري لسدورة عمل ديزل وارتباطه بنسبة الحفن φ ونسبة الانضغاط $\varepsilon = 14$ ونسبة الضغوط $p_2/p_1 = 40.2$ ، أس الايزتروبي $k = 1.4$ من أجل $\varphi = 1$ أي دورة أوتو فإن $\eta_{th} = 0.65$.

نسبة الحفن φ	2	3	4	5
المردود الحراري η_{th}	0.59	0.55	0.51	0.47

المردود الفعلي (الفعال)

المردود الفعلي لحرك احتراق داخلي هو نسبة الاستطاعة الميكانيكية المفيدة للمحرك P_e إلى تيار الحرارة المضافة مع الوقود Q_F .

$$(25.9) \quad \eta_e = P_e / Q_F$$

وكذلك:

$$(26.9) \quad \eta_e = \eta_{th} \eta_g \eta_m = \eta_i \eta_m$$

يُحسب المردود الحراري η_{th} بدلالة الاستطاعة النظرية للمحرك كما يلي:

$$(27.9) \quad \eta_{th} = P_{th} / Q_F$$

ودرجة الجودة η_{good} هي نسبة الاستطاعة الدليلية للمحرك P_i إلى الاستطاعة النظرية:

$$(28.9) \quad \eta_{good} = P_i / P_{th}$$

أما المردود الدليلي:

$$(29.9) \quad \eta_i = P_i / Q_F$$

والردود الميكانيكي:

$$(30.9) \quad \eta_m = P_e / P_i$$

الاستطاعة الميكانيكية

تُحسب الاستطاعة الدليية للمحرك كما يلي:

$$(31.9) \quad P_i = V_s p_i n / \pi \quad [\text{kW}]$$

حيث: V_s حجم الإزاحة للمحرك $[\text{m}^3]$

p_i الضغط الدليي $[\text{kPa}]$

n سرعة الدوران $[\text{min}^{-1}]$

n 120 للمحركات الرباعية الأشواط، و 60 للمحركات الثنائية الأشواط.

الاستهلاك النوعي للوقود

يحسب الاستهلاك النوعي للوقود في محرك الاحتراق الداخلي كما يلي:

$$(32.9) \quad S_{ef} = 3.6 \times 10^6 m_p / P_e = 10^3 / \eta_e \text{ LCV} \quad [\text{g/kWh}]$$

حيث: m_p استهلاك الوقود $[\text{kg/s}]$

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود $[\text{kWh/kg}]$.

من أجل محركات أوتو أو ديزل يمكن اعتماد القيم الاسترشادية التالية:

— نسبة الانضغاط ε في محركات أوتو تتراوح بين 7 و 11 وفي محركات ديزل 14-24،

— نسبة الضغط P_2/P_1 لمحركات أوتو تتراوح بين 10 و 15 وفي محركات ديزل 24-50،

— درجة الجودة $\eta_{\text{good}} = 0.7 - 0.9$ ،

— الردود الميكانيكي لمحركات أوتو 0.8 إلى 0.9 ومحركات ديزل 0.75-0.85،

— الردود الفعال لمحركات أوتو 0.2 إلى 0.3 ومحركات ديزل 0.27-0.36،

— الاستهلاك النسوي للوقود لمحركات أوتو S_{ef} يبلغ 250 إلى 380 ومحركات ديزل 240 حتى

290 g/kWh.

مثال 2.9

محرك ديزل رباعي الأشواط يتمتع بالمواصفات التالية: حجم الإزاحة $V_s = 5.71$ ، نسبة

الانضغاط $\varepsilon = 17$ ، سرعة الدوران $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ ، الضغط الدليي $p_i = 1000 \text{ kPa}$.

ما هي قيمة الاستطاعة الدليلية والفعالة وكذلك المردود الفعال للمحرك إذا كان الاستهلاك النوعي للوقود 240 [g/Kwh] (القيمة الحرارية الدنيا لوقود الديزل $\text{LCV} = 11.67 \text{ kWh/kg}$) المردود الميكانيكي $\eta_m = 0.85$ ؟

الحل

الاستطاعة الدليلية للمحرك:

$$\begin{aligned} P_i &= V_s p_i n / u \\ &= 5.75 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kPa} \times 3000 \text{ min}^{-1} / 120 \\ &= 143.75 \text{ kW} \end{aligned}$$

الاستطاعة الفعالة للمحرك:

$$\begin{aligned} P_e &= P_i \eta_m \\ &= 143.75 \text{ kW} \times 0.85 = 122.2 \text{ kW} \end{aligned}$$

وينتج الآن المردود الفعال:

$$\begin{aligned} \eta_e &= 10^3 / \text{Scf}_e \text{ LCV} \\ &= 10^3 / 240 \text{ g/kWh} \times 11.67 \text{ kWh/kg} = 0.357 \end{aligned}$$

3.4.9 الموازنة الحرارية واستهلاك الوقود لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء

الموازنة الحرارية لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء تكتب كما يلي (كل الحدود بال kW)

$$(33.9) \quad Q_F = P_{el} + Q_H + Q_{LOS}$$

حيث: Q_F تدفق الحرارة المنطلقة من الوقود

P_{el} الاستطاعة الكهربائية

Q_H الاستطاعة الحرارية المأخوذة من المجموعة

Q_{LOS} تدفق الحرارة الضائعة.

بحسب التيار الحراري المرسل مع الوقود كما يلي:

$$(34.9) \quad Q_F = m_F \text{ LCV } \eta_{TFS} \quad [\text{kW}]$$

حيث: m_F استهلاك الوقود $[\text{kg/s}]$

LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود $[\text{kJ/kg}]$

η_{TPS} مردود مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء.

استهلاك الوقود (الوقود الغازي، السائل الخفيف، وقود الديزل) في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء يُحسب كما يلي:

$$(35.9) \quad m_F = Q_F / (\eta_{TPS} LCV) \quad [\text{kg/s}] \text{ أو } [\text{m}^3/\text{s}]$$

يتم أخذ الحرارة في المبادلات الحرارية المتصلة بماء التبريد وبغازات الاحتراق (العادم)، ولذلك تتألف الاستطاعة الحرارية المفيدة لمجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء من:

$$(36.9) \quad Q_H = Q_{CW} + Q_G \quad [\text{kJ/s}]$$

حيث: Q_{CW} الاستطاعة الحرارية لمبادل ماء التبريد $[\text{kW}]$

Q_G الاستطاعة الحرارية لمبادل غازات الاحتراق $[\text{kW}]$.

نُحسب هاتان الاستطاعتان بالاعتماد على التدفق الكتلي لماء التسخين $m_{HW} [\text{kg/s}]$ والسعة الحرارية النوعية للماء $C_{p,W} (4.187 \text{ kJ/kgK})$ وعلى ارتفاع درجة الحرارة لماء التسخين إما في مبادل ماء التبريد $\Delta t_{cw} [\text{K}]$ أو في مبادلات غازات الاحتراق $\Delta t_G [\text{K}]$.

$$(37.9) \quad Q_{CW} = m_{HW} c_{pW} \Delta t_{CW}$$

$$(38.9) \quad Q_G = m_{HW} c_{pW} \Delta t_G$$

التدفق الإجمالي للحرارة المفيدة في مجموعة التدفئة وتوليد الكهرباء يصبح:

$$(39.9) \quad Q_H = m_{HW} c_{pW} (t_1 - t_2) \quad [\text{kJ/s}]$$

حيث: t_1 درجة حرارة الماء الساخن الزاخر

t_2 درجة حرارة الماء الساخن العائد (الراجع).

أما الموازنة الحرارية لمبادل غازات الاحتراق فهي:

$$(40.9) \quad Q_G = m_G c_{pG} \Delta t_G = m_{HW} c_{pW} \Delta t_{HW} \quad [\text{kW}]$$

حيث: m_G التدفق الكتلي لغازات الاحتراق $[\text{kg/s}]$

$C_{p,G}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لغازات الاحتراق $[\text{kJ/kgK}]$

Δt_G فرق درجات الحرارة في مبادل غازات الاحتراق $[\text{K}]$

Δt_{HW} ارتفاع درجة حرارة ماء التسخين في مبادل غازات الاحتراق $[\text{K}]$.

تُحسب درجة حرارة غازات الاحتراق عند مخرج مبادل الغازات كما يلي:

$$(41.9) \quad t_{G,exit} = t_{G,ent} - Q_G / (m_F V_G c_{p,G})$$

حيث: $T_{G,ent}$ درجة حرارة الغازات عند مدخل مبادل الغازات [°C]

V_G كمية الغازات الناتجة [m³ لكل kg أو m³ لكل m³ من استهلاك الوقود] (تُحسب

هذه القيمة من حسابات الاحتراق، انظر الفصل الثاني)

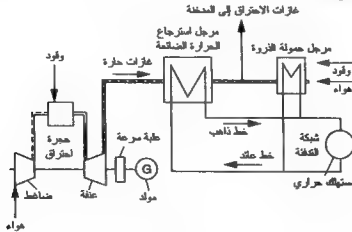
$c_{p,G}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط لغازات الاحتراق [kJ/kgK].

تُصمَّم محطات التدفئة وتوليد الكهرباء عادةً بحسب الاستهلاك الحراري اللازم، أما التيار الكهربائي المولّد فيفضل أن يستخدم بشكل كامل ما أمكن في الأبنية التي تتم تدفئتها.

5.9 محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة التي تستخدم العنفات الغازية

محطات التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية ذات العنفات الغازية

تقسم في هذه المحطات الاستطاعة التي تولدها العنفة الغازية إلى الاستطاعة المفيدة للمولد الكهربائي وإلى الاستطاعة المقدمة لتشغيل الضاغط، كما يستفاد من حرارة غازات الاحتراق المغادرة للعنفة في مرجل لاستعادة (استرجاع) الحرارة الضائعة لتسخين ماء التدفئة المستخدم للتدفئة القريبة أو البعيدة عن موقع المحطة. لقد تمَّ في الفصل السابع استعراض التحليل الترموديناميكي لدورة عمل العنفة الغازية.



الشكل 12.9 : عنطط عمل محطة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية ذات العنفة الغازية.

أما تركيب محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات العنفة الغازية فهو مبين بشكل تخطيطي في الشكل (12.9). يتم أخذ حرارة التدفئة عن طريق مرجل استرجاع الحرارة الضائعة. الاستطاعة الحرارية المأخوذة:

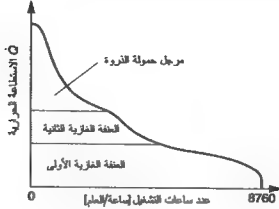
$$Q_H = m_{HW} c_{PW} \Delta T_{HW} \quad (42.9)$$

سنعرض على سبيل المثال محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Köpenick في برلين، وهي تتألف من عنفتين غازيتين ومرجلين لاسترجاع الحرارة الضائعة وثلاثة مراحل لحمولات الذروة. يتضمن التحضير المتعدد المراحل للماء الدافئ بالإضافة إلى التدوير الدائم الوصول إلى درجة الحرارة 55 °C، ويتم بذلك في نفس الوقت تبريد الخط الراجع لماء التسخين. الموصفات الفنية لكل من وحدتي محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Köpenick معطاة في الجدول (5.9).

الجدول 5.9: الموصفات الفنية لمحطة التدفئة وتوليد الكهرباء اللامركزية Köpenick (برلين).

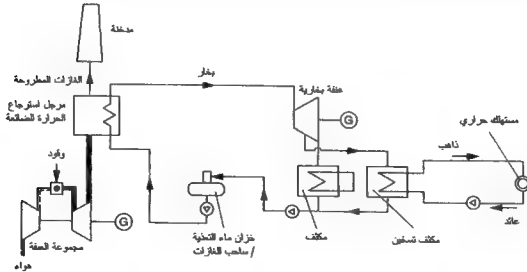
الموصفات الفنية	الجهاز
1. الصفة الغازية	نوعها Solor Taurus 7000
ثلاثية المراحل	سرعة الدوران
14950 min^{-1}	درجة حرارة الغازات المغادرة للصفة
حوالي 480 °C	2. الضاغط
يمحوي 12 مرحلة	3. حجرة الاحتراق
حجرة احتراق حلقة ذات 12 فوهة (فتحة)	الوقود
غاز طبيعي، الوقود السائل الحثيف (المازوت)	4. المولد الكهربائي
MW 5.3	الاستطاعة الكهربائية P_{el}
1500 min^{-1}	سرعة الدوران
MW 9.3	5. مرجل استرجاع الحرارة الضائعة
حوالي 110 °C	استطاعته الحرارية
MW 9.3	6. درجة حرارة الغازات المغادرة
حوالي 110 °C	الاستطاعة الحرارية
غاز طبيعي، وقود سائل خفيف (مازوت)	درجة حرارة الغازات المغادرة
	نوع الوقود

في شبكة لتوزيع الحرارة ثنائية الخطوط طول تمديداتها 10.1 km وقطر أنابيبها 0.5 m تنظم درجة الحرارة للخط الناهب بشكل متقلب من 80 حتى 135 °C. وهناك 83 محطة تبادل حراري استطاعتها الحرارية 60 MW. بلغت الكلفة الإجمالية محطة التدفئة وتوليد الكهرباء Köpenick 26 مليون مارك ألماني.



الشكل 13.9 : تغطية الاستهلاك الحراري في محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ومرجل حمولة الذروة (وتوضعها على منحنى التحميل السنوي).

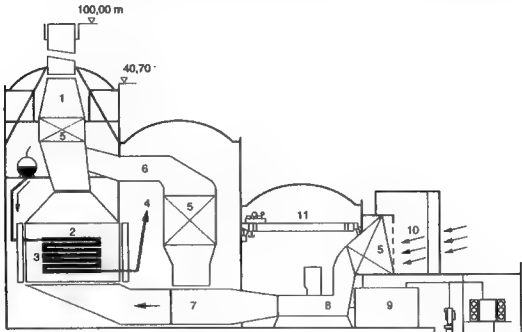
يبين الشكل (13.9) منحنى التحميل السنوي لفرض التدفئة، وكذلك مجالات تشغيل العنفات الغازية ومرجل حمولة الذروة. ويتضح أن العنفة الأولى تستخدم 6200 ساعة في العام والثانية تستخدم 5000 ساعة/العام ومرجل حمولة الذروة 3500 ساعة/العام.



الشكل 14.9 : المخطط المشتركة (الدائرة المركبة) لتوليد الكهرباء والحرارة.

محطة التدفئة وتوليد الكهرباء ذات العنفة الغازية

يبين الشكل (14.9) محطة مشتركة لتزويد المشتركين بالكهرباء والحرارة بشكل تخطيطي. تتألف هذه المحطة المشتركة (الدائرة المركبة) من المجموعات التالية: مجموعة العنفة، مرحلة استرجاع الحرارة الضائعة، العنفة البخارية ذات الضغط المقابل (الخلفي) مع المولد. تستخدم أولاً الغازات الساخنة المغادرة للعنفة الغازية لتوليد البخار في مرحلة استرجاع الحرارة الضائعة، ثم يتمدد البخار المتولد في عنفة الضغط المقابل حتى مستوى الضغط المطلوب لتسخين ماء التدفئة. ترتيب وتوضيح أجزاء هذه المنشأة أي العنفة الغازية ومرحلة استرجاع الحرارة الضائعة مبين على الشكل (15.9).



- | | |
|----------------------------------|---------------------------------|
| 1. مدخنة | 6. مجرى جانبي |
| 2. مرحلة استرجاع الحرارة الضائعة | 7. مجرى لغازات الاحتراق |
| 3. مولد البخار | 8. عنفة غازية |
| 4. بخار إلى العنفة البخارية | 9. مولد كهربائي |
| 5. مضمد صوت (كلم صوت) | 10. مدخل للهواء مع مصفاة للهواء |
| | 11. رافعة |

الشكل 15.9 : توضع مركبات العنفة الغازية مع مرحلة الحرارة الضائعة في منشأة مشتركة لتوليد التدفئة.

يجري تسخين ماء التدفئة بالدرجة الأولى في مسخنات ماء التغذية بواسطة البخار المنفلت من العنفة البخارية، كما تستخدم حرارة مرحلة استرجاع الحرارة الضائعة لهذا الغرض. تزود المنشأة

عادةً يمرجل حولة الذروة الذي يؤمن الحرارة اللازمة عند درجات الحرارة الخارجية المنخفضة جداً.

يتميز هذا النوع من المنشآت بالكسب الكبير للكهرباء والاستغلال الجيد للوقود.

6.9 وفر الطاقة واقتصادية استخدام منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء

يبين الشكل (4.9) مقارنة بين توزيع الطاقة في محطة توليد الكهرباء ذات عتفة التكاثف وتوزع الطاقة في محطة توليد مشترك للكهرباء وللحرارة. عند استخدام النوع الثاني يتحقق وفر في الطاقة. إن استهلاك الطاقة في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء أقل من مجموع الاستهلاك في محطة توليد الكهرباء البخارية ومحطة التدفئة عند توليد نفس الكميات من الكهرباء والحرارة في المنشأتين. يُحسب الوفر الذي يمكن الحصول عليه في استهلاك الوقود لمنشأة بالتدفئة وتوليد الكهرباء مقارنة بعملية التوليد المنفصل للكهرباء والحرارة كما يلي:

$$(43.9) \quad \Delta m = m_{\text{separate}} - m_{\text{TPS}} \quad [\text{kg/s أو } m^3/\text{s}]$$

حيث: m_{separate} استهلاك الوقود عند التوليد المنفصل للكهرباء والحرارة
 m_{TPS} استهلاك الوقود في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء.

مثال 3.9

ما هو الوفر في الطاقة الأولية لمنشأة التدفئة وتوليد الكهرباء مقارنة بعملية التوليد المنفصل للكهرباء والحرارة في محطة توليد كهرباء (Power Station) وفي محطة تدفئة (Heating Station)؟
تتم المقارنة بين الأسلوبين بناءً على تساوي الطاقة المولدة أي توليد الكهرباء بمعدل $E_{\text{el}} = 80 \text{ MWh}$ وتوليد الحرارة $Q_{\text{H}} = 100 \text{ MWh}$.

يبلغ مردود كل عملية كالتالي: المردود الصافي لمحطة الطاقة البخارية $\eta_{\text{sp}} = 36\%$ ومحطة التدفئة $\eta_{\text{TPS}} = 88\%$ ، المردود الفعلي لاستخدام الطاقة في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء $\eta_{\text{TPS}} = 88\%$. القيمة الحرارية الدنيا للوقود $\text{LCV} = 11 \text{ kWh/kg}$.

الحل

1. بما أن المردود الفعلي لاستخدام الطاقة في منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء يبلغ 88% فإن استهلاك الطاقة الأولية لإنتاج 80 MWh كهرباء (E_{el}) و 100 MWh حرارة (Q_{H}):

$$Q_{PS} = (E_{el} + Q_H) / \eta_{TPS}$$

$$= 80 + 100 / 0.88 = 204.5 \text{ MW}$$

2. عند التوليد المنفصل للكهرباء وللحرارة فإن استهلاك الطاقة الأولية:

$$Q_{separate} = E_{el} / \eta_{SP} + Q_H / \eta_{HS}$$

$$= 80 / 0.36 + 100 / 0.9 = 333.3 \text{ MWh}$$

3. استهلاك الوقود عند التوليد المنفصل للكهرباء وللحرارة:

$$m_{separate} = E_{separate} / LCV$$

$$= 333.3 \times 10^3 \text{ kWh} / 11 \text{ kWh/kg} = 30.3 \times 10^3 \text{ kg}$$

4. الوفرة في الطاقة الأولية عند استخدام منشأة التدفئة وتوليد الكهرباء (دائرة مركبة):

$$\Delta E = E_{separate} - E_{TPS}$$

$$= 333.3 - 204.5 = 128.8 \text{ MWh}$$

5. الوفرة في الوقود

$$\Delta m_F = \Delta E / LCV$$

$$= 128.8 \times 10^3 \text{ kWh} / 11 \text{ kWh/kg} = 11.7 \times 10^3 \text{ kg}$$

أو:

$$\Delta m_F / m_{separate} = 38.6 \%$$

تناسب منشأة توليد الكهرباء والتدفئة التي تستخدم محركات الاحتراق الداخلي للخدمة في مجال الاستطاعات الصغيرة والمتوسطة أي بين 80 kW وحتى 10 MW، ومن أجل الاستطاعات الحرارية الأعلى تستخدم منشآت توليد الكهرباء والتدفئة (الدائرة المركبة) ذات العنفة الغازية.

وفسلاً لنوع المحرك والوقود المستخدم فإن المردود الكهربائي لمنشآت توليد الكهرباء والتدفئة وفقاً لنوع المحرك والوقود المستخدم فإن المردود الكهربائي لمنشآت توليد الكهرباء والتدفئة $\eta_{el} = P_{el} / Q_F$ يتراوح بين 30 و35%، ودرجة الاستفادة من الطاقة في المنشأة $\eta_{TPS} = (P_{el} + Q_H) / Q_F$ تتراوح بين 85 و90%، أما الرقم المميز للتيار فيتراوح بين 0.6 و0.8. تُزوّد منشأة توليد الكهرباء والتدفئة بمنظومة إدارة تُمكن من الحصول على تشغيل أوتوماتيكي بشكل كامل، وذلك عن طريق أجهزة التحكم.

يُعتبر عند تصميم هذه المنشأة بأن زمن الاستفادة منها هو 20 عاماً، تستهلك الاستثمارات (يسترد رأس المال للمستثمر) بعد 5 أعوام كحد أقصى.

تزداد اقتصادية هذه المنشأة عندما يستهلك التيار الكهربائي والحرارة طوال العام، وهذا يؤدي إلى ربط إنتاج كل من الكهرباء والحرارة والبرودة. مثل هذه المنشآت المشتركة تقدم الكهرباء طوال العام والحرارة للتدفئة في فصل الشتاء والبرودة المفيدة لتكييف أبنية الورش والمكاتب الرسمية في فصل الصيف.

اقتصادية استخدام منشأة توليد الكهرباء والتدفئة اللامركزية

تتعلق الاقتصادية بزمان الاستخدام ϵ_u للمنشأة.

يُعرف زمن الاستخدام ϵ_u بأنه النسبة بين الإنتاج السنوي للكهرباء والاستطاعة الاسمية المركبة للمولد P_{el} أو بأنه النسبة بين الإنتاج السنوي للحرارة Q_H إلى الاستطاعة الاسمية الحرارية Q_H للمنشأة:

$$(44.9) \quad \epsilon_u = E_{el} / P_{el} \quad \text{أو} \quad \epsilon_u = Q_H / Q_H \quad [\text{h/a}] \quad [\text{ساعة/عام}]$$

يتحدد زمن الاستخدام من خلال الحرارة المقدمة في منشأة توليد الكهرباء والتدفئة اللامركزية كما يلي:

الاستهلاك المعياري (norm) للحرارة Q_N [W] في مشروع ما والاستطاعة الحرارية للتدفئة Q_H [W] لجملة المنشآت التي تقوم بتوليد الكهرباء والتدفئة وساعات الاستخدام الكامل b_v [h/a] ودرجة حرارة الوسط الخارجي المعيارية t_{amb} [°C] (الحرارة المحيطية المعيارية). الإنتاج السنوي للحرارة لجملة من المنشآت التي تقوم بتوليد الكهرباء والتدفئة هو جداء زمن الاستخدام ϵ_u بالاستطاعة الحرارية للحملة Q_H :

$$(45.9) \quad Q_{HM} = \epsilon_u Q_M \quad [\text{J/a}]$$

يُحدد زمن الاستخدام ϵ_u بشكل منفصل لكل جملة على حدة.

إذا استخدمت على سبيل المثال مجموعتان متماثلتان من منشآت توليد الكهرباء والتدفئة، الاستطاعة الحرارية لكل منها 200 kW لتدفئة بناء للمكاتب في برلين والاستهلاك الوسطي المعياري للحرارة $Q_N = 1000 \text{ kW (Norm)}$ ، فإن زمن الاستخدام (الاستفادة) ϵ_u هو 2480 h/a وعموماً يقابل عدد ساعات استخدام كامل قدره $b_v = 1600 \text{ h/a}$. عدد ساعات الاستهلاك الكامل b_v يُعرف بأنه النسبة بين الاستهلاك السنوي لحرارة التدفئة والاستهلاك المعياري للحرارة في المشروع (حاجة المشروع من الحرارة معيارياً).

مثال 4.9

يطلب تحديد زمن استرداد رأس المال لمنشأة توليد الكهرباء والتدفئة التي تحرق الغاز ذات الاستطاعة الكهربائية 500 kW والاستطاعة الحرارية 900 kW. المعطيات اللازمة للحل تُذكر مع الحل.

الحل

1. تكاليف الطاقة لإنتاج الحرارة بشكل تقليدي مع التيار الكهربائي.

(a) انطلاقاً من أن الاستطاعة الكهربائية للمحطة العاملة على الغاز هي 500 kW والاستطاعة الحرارية لها 900 kW، وكذلك، بمعرفة زمن الاستفادة $\eta_0 = 2480 \text{ h/a}$ ومردود مرجل التدفئة $\eta_{HB} = 0.85$ ، فالاستهلاك السنوي للوقود (الغاز الطبيعي) الذي قيمته الحرارية الدنيا $LCV = 9.3 \text{ kWh/m}^3$ هو 2.63 GWh/a (يسلغ إنتاج الحرارة عندئذ 2.23 GWh/a) أو $2.82 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{a}$.

إذا كان سعر الغاز 0.7 DM/m^3 (0.7 مارك ألماني لكل متر مكعب)، فإن تكاليف إنتاج الحرارة باستخدام مرجل التدفئة التقليدي حوالي 0.2 مليون مارك ألماني في العام.

(b) انطلاقاً من أن إنتاج الكهرباء 3.6 GWh/a وسعر التيار الكهربائي 0.25 DM/kWh فإن تكلفة إنتاج الكهرباء 0.9 مليون مارك ألماني في العام.

(c) التكاليف السنوية للطاقة بما فيها إنتاج الحرارة بالطريقة التقليدية بالإضافة إلى إنتاج التيار الكهربائي: $0.2 + 0.9 = 1.1 \times 10^6 \text{ DM/a}$.

2. تكاليف الطاقة لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة.

بما أن درجة الاستخدام للمنشأة 0.85 والإنتاج السنوي للحرارة والكهرباء $3.6 + 2.23 = 5.83 \text{ GWh/a}$ وبما أن سعر الغاز هو 0.7 DM/m^3 فإن قيمة إنتاج الطاقة في هذه المنشأة:

$$\frac{0.7 \text{ DM/m}^3 \times 5.83 \times 10^6 \text{ kWh/a}}{0.87 \times 9.3 \text{ kWh/m}^3} = 0.5 \times 10^6 \text{ DM/a}$$

3. تكاليف الصيانة منسوبة إلى إنتاج الكهرباء (0.05 DM لكل kWh) تصبح:

$$0.18 \times 10^6 \text{ DM/a} = 0.05 \text{ DM/kWh} \times 3.6 \text{ GWh/a}$$

* DM تعني مارك للأن.

الكسب السنوي (الربح) للمنشأة هو الفرق بين تكاليف الطاقة للتوليد التقليدي للطاقة و كلفة توليدها في منشأة توليد الكهرباء والتدفع و مراعاة تكاليف الصيانة:

$$1.1 - 0.5 - 0.18 = 0.41 \times 10^6 \text{ DM/a}$$

4. زمن الاسترداد إذا كانت تكاليف الاستثمار النوعية (التكاليف التأسيسية) لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة هي 1700 DM لكل 1 kW استطاعة كهربائية فإن الكلفة الإجمالية لاستثمار هذه المنشأة تبلغ: $1700 \text{ DM/kWh} \times 500 \text{ kW} = 0.85 \text{ DM مليون/العام}$
فزمن الاسترداد المحسوب إحصائياً هو: $2.07 = 0.85/0.41$ عاماً.

5.9 مثال

يُطلب تحديد المردود الكهربائي ودرجة الاستخدام الإجمالية للطاقة لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة اللامركزية ذات المحرك الغازي والتي استطاعتها الحرارية للتدفع $Q_H = 930 \text{ kW}$ والرقم المميز للتيار σ فيها يبلغ 0.72.

يحرق في المحرك الغازي 0.04 kg من الغاز الطبيعي ذي القيمة الحرارية الدنيا $LCV = 46000 \text{ kJ/kg}$ كل ثانية.

الحل

1. التدفق الحراري مع الوقود:

$$Q_F = m_F LCV \\ = 0.04 \text{ kg/s} \times 46000 \text{ kJ/kg} = 1840 \text{ kJ/s}$$

2. الاستطاعة الكهربائية لمنشأة توليد الكهرباء والحرارة

$$P_{el} = \sigma Q_H = 0.72 \times 930 = 669.6 \text{ kW}$$

3. المردود الكهربائي للمنشأة:

$$\eta_{el} = P_{el} / Q_F \\ = 669.6 / 1840 = 0.364$$

4. درجة الاستخدام للمنشأة:

$$\eta_{total} = (P_{el} + Q_H) / Q_F \\ = (669.6 + 930) / 1840 = 0.869$$

10 المنشآت الشمسية الحرارية والكهروضوئية (الفوتوفولطية)

1.10 الإشعاع الشمسي، المجمعات الشمسية، المعدات الشمسية الحرارية

الإشعاع الشمسي من خارج الأرض (extraterrestrial) والثابت الشمسي تُشع الشمس في كل ثانية تياراً حرارياً إجمالياً قيمته حوالي $4 \times 10^{33} \text{ kW}$ ، يصل منه جزء صغير إلى الأرض قيمته 2.16×10^{25} بزاوية فراغية قيمتها 32° أو 0.54° حسب الحال. يتضمن الطيف الشمسي الموجات التي يتراوح طولها λ بين 0.25 حتى ما يزيد على $0.5 \mu\text{m}$ ، أي الإشعاعات فوق البنفسجية، والضوء المرئي ($0.38 \mu\text{m} - 0.78 \mu\text{m}$) والأشعة تحت الحمراء. يعادل الإشعاع القادم من خارج الأرض والساقط على الحدود الخارجية للغلاف الجوي للأرض ($0.6 \times 10^{24} \text{ J}$ في العام) إشعاع جسم أسود درجة حرارته 5777 K . تدعى شدة الإشعاع القادم من خارج الأرض والذي يسقط بشكل عمودي على مساحة من الأرض بعدها الوسطي عن الشمس 149.5 مليون كيلومتراً، تدعى بالثابت الشمسي $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$.

الإشعاع العام (global) — الإشعاع المنتشر

يتألف الإشعاع العام E الساقط على السطح الخارجي للأرض من الإشعاع المنتشر E_d والإشعاع المباشر E_b . تتعلق شدة الإشعاع العام I بالموقع الجغرافي (خط العرض) وبالوقت (من اليوم أو من السنة) وحالة الجو، وتكون قيم الإشعاعات أعظمية في الحزام الصحراوي للأرض على جانبي خط الاستواء (في شمال أفريقيا، الشرق الأوسط، وسط آسيا، شمال وجنوب أمريكا، أستراليا). يتراوح الإشعاع العام الوسطي على سطح الأرض في السنة بين 800 و 2400 kWh لكل m^2 . وتكون

قيمته في وسط أوروبا 900 حتى 1100 kWh/m² في العام (في الجبال تصل القيمة إلى 1400 kWh/m² في العام).

من القيم المميزة للإشعاع الشمسي في موقع معين هناك فترة سطوع الشمس اليومية أو السنوية، وتبلغ قيمتها في شمال أفريقيا 3200 حتى 3465 h/a (ساعة في اليوم)، وفي جنوب أوروبا 2300 إلى 2810 h/a وفي وسط أوروبا 1400 إلى 1900 h/a.

يتضمن المرجع [11] معطيات الإشعاع والمناخ للعالم وأوروبا وألمانيا.

الإشعاع الإجمالي الساعي أو اليومي على مجمّع (لاقط) شمسي

توضع المجمّعات إما بشكل مائل أو توجّه نحو الشمس. يتألف الإشعاع الساقط على مجمع مستوٍ (مسطح) مائل من إشعاع مباشر وإشعاع منتشر وإشعاع منعكس على الأرض.

لحساب الإشعاع المباشر الساعي على سطح مائل موجه نحو الجنوب تطبق العلاقة التالية:

$$\begin{aligned} I_{Dk} &= I_D \cos \theta_k / \cos \theta \\ (1.10) \quad &= I_D [\cos (\varphi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin (\varphi - \beta) \sin \delta] \\ &/ [\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \delta] \quad [\text{MJ}] \quad \text{أو} \quad [\text{kWh/m}^2 \cdot \text{h}] \end{aligned}$$

حيث: I_D الإشعاع المباشر الساعي على سطح أفقي

θ أو θ_k زاوية سقوط الإشعاع المباشر على سطح مجمع أفقي، أو على سطح مجمع مائل موجه نحو الجنوب.

β زاوية ميل المجمع الشمسي

φ العرض الجغرافي

δ ميل (انحراف) الشمس

ω الزاوية الساعية.

ولحساب الإشعاع اليومي المباشر الساقط على مجمع مائل موجه نحو الجنوب تطبق العلاقة

التالية:

$$\begin{aligned} E_{Dk} &= E_D [\cos (\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega_k + (\pi \omega_k / 180) \\ (2.10) \quad &\sin (\varphi - \beta) \sin \delta] / [\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi \omega_s / 180) \\ &\sin \varphi \sin \delta] \quad [\text{MJ}] \quad \text{أو} \quad [\text{kWh/m}^2 \text{ day}] \end{aligned}$$

حيث: ω_k الزاوية الساعية لغروب الشمس من أجل سطح مائل لليوم المعبر، ω_g الزاوية الساعية لغروب الشمس من أجل سطح أفقي لليوم المعبر.
ولحساب ω_k و ω_g نكتب:

$$(3.10) \quad \omega_k = \arccos (-\tan \varphi \tan \delta)$$

$$(a3.10) \quad \omega_g = \arccos [-\tan (\varphi - \beta) \tan \delta]$$

يبلغ الإشعاع الإجمالي في ساعة I_k مقدار بالـ $[MJ/m^2 h]$ أو $[kWh/m^2 h]$ الذي يسقط خلال ساعة واحدة على سطح بمجم مائل مساحته $1 m^2$:

$$(4.10) \quad I_k = I_D R_D + I_g (1 + \cos \beta) / 2 + I \rho (1 - \cos \beta) / 2$$

حيث: I ، I_D ، I_g الإشعاع الساعي الإجمالي والمباشر والمتنثر حسب التسلسل، وذلك على سطح أفقي.

ρ درجة الانعكاس للأرض (Albedo): قياس قدرة سطح على عكس النور).

ولحساب الإشعاع الإجمالي في الساعة يستخدم عامل التحويل التالي:

$$R = I_k / I$$

$$(5.10) \quad = I_{Dk} / I_D + I_g / I (1 + \cos \beta) / 2 + \rho (1 - \cos \beta) / 2$$

أما الإشعاع الإجمالي اليومي $[MJ/m^2\text{-day}]$ أو $[kWh/m^2\text{-day}]$ الذي يسقط على $1 m^2$ من سطح المجمع المائل فيبلغ:

$$(6.10) \quad E_k = E \cdot R = E_{Dk} + E_g (1 + \cos \beta) / 2 + E \rho (1 - \cos \beta) / 2$$

أما عامل التحويل للإشعاع الإجمالي اليومي فهو:

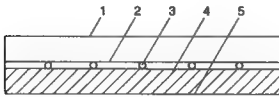
$$(7.10) \quad R = E_{Dk} / E_D + E_g / E (1 + \cos \beta) / 2 + \rho (1 - \cos \beta) / 2$$

يمكن الحصول على المعلومات التفصيلية عن الإشعاع الشمسي من المرجع [11].

المجمعات الشمسية

يتمتع المجمع الشمسي الإشعاع الشمسي ثم يقوم بتحويله إلى حرارة. وهناك أنواع مختلفة من المجمعات مثل المجمعات المركزة والمجمعات غير المركزة والمجمعات ذات درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة والعالية [المرجع 11].

تستخدم في المجالات ذات درجات الحرارة المنخفضة (دون الـ 100°C) المجمعات المسطحة أو المفرغة التي تستفيد من الإشعاع المباشر والإشعاع المنتثر وتُرَكَّب في موقع ثابت وبشكل مائل. يوضح الشكل (1.10) بشكل تخطيطي تركيب مجمع مسطح، وهو يتألف من صفيحة امتصاص وصفٍّ من الأنابيب أو المجاري يمر فيها ناقل حراري سائل وغطاء شفاف وعلبة (غلاف) مع عازل حراري. تستطيع المجمعات المسطحة المستخدمة لتأمين الماء الساخن للعمليات الصناعية أو للتدفئة توفير طاقة قدرها 250 إلى 400 kWh/m²year وذلك في المناخ السائد في وسط أوروبا (400 كيلو واط ساعة لكل 1 m² في السنة). أما المجمعات ذات الأنابيب المفرغة فهي تستخدم حتى درجات الحرارة 250 °C، ومجال استعمالها هو تأمين الماء الساخن والتدفئة والتبريد وعملية إنتاج الحرارة. يصل الكسب السنوي للمجمعات ذات الأنابيب المفرغة إلى 300 وحتى 600 kWh/m².

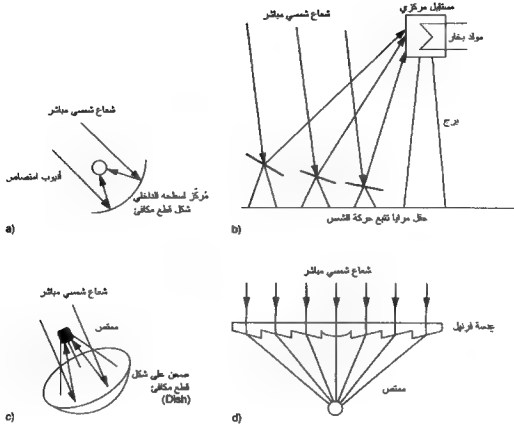


- 1 غطاء شفاف
- 2 صفيحة امتصاص
- 3 أنبوب نقل للحرارة
- 4 عازل للحرارة
- 5 صندوق (غلاف)

الشكل 1.10 : تركيب مجمع مسطح.

وبمجالات درجات الحرارة المتوسطة والعالية تستخدم المجمعات المركزة. يتألف المجمع المركّز (الشكل 2.10) من مركّز (مرايا أو عدسات فريزل) ولا قط للإشعاع. وبواسطة المركّز تُرَفَّع شدة الإشعاع الساقط على لا قط الإشعاع بنسبة التركيز $C = A_0 / A$ حيث A_0 مساحة سطح الفتحة أو الفجوة (Aperture) و A مساحة السطح الممتص.

تجمع المجمعات المركزة الإشعاع المباشر فقط، ولذلك يجب أن تتبع الشمس، وهي ذات نسبة تركيز مرتفعة، حيث يمكن الوصول إلى درجات حرارة عمل تفوق الـ 1000 °C. تستخدم المجمعات المركزة بالدرجة الأولى في المنشآت الشمسية الحرارية لتوليد التيار الكهربائي ولتأمين الحرارة لبعض العمليات الصناعية [11].



الشكل 2.10 : المجمعات المركزة (a) المركز على شكل قطع مكافئ، (b) حقل مرايا تتبع حركة الشمس مع مستقبل مركزي (مستقبل الإشعاع)، (c) صحن على شكل قطع مكافئ، (d) عدسة فريزل.

الاستطاعة الحرارية المفيدة ومردود المجمع الشمسي (كفاءة المجمع الشمسي)

تُحسب الاستطاعة الحرارية المفيدة لمجمع مسطح كما يلي [11].

$$(8.10) \quad Q_k = A [I_k F_R (\tau \alpha) - F_R + K_k (T_{ext} - T_{amb})] \quad [W]$$

حيث: A مساحة سطح المجمع $[m^2]$

I_k شدة الإشعاع الشمسي في مستوى المجمع $[W/m^2]$

F_R عامل طرح الحرارة أو انتقالها من المجمع

$(\tau \alpha)$ الجداء الفعال لدرجة إرسال (نقل) الغطاء الشفاف τ ودرجة الامتصاص لهذا

الغطاء

K_k عامل ضياع الحرارة الإجمالي للمجمع $[W/m^2K]$

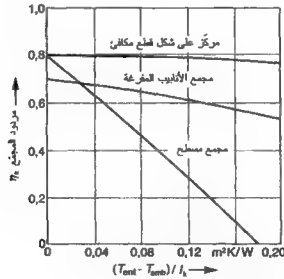
T_{amb} و T_{ent} درجة الحرارة عند الدخول إلى المجمع ودرجة حرارة الوسط الخارجي (درجة الحرارة المحيطة) $[^{\circ}C]$.

يُعرف مردود (كفاءة) مجمع بأنه الاستطاعة الحرارية المفيدة مقسومة على تيار الحرارة الذي يسقط على سطح المجمع، أي:

$$(9.10) \quad \eta_k = Q_k / (A I_k)$$

وتحسب مردود مجمع مسطح بالعلاقة:

$$(10.10) \quad \eta_k = F_R [(\tau \alpha) - K_k (T_{ent} - T_{amb}) / I_k]$$



الشكل 3.10 : المنحنيات المميزة لمختلف أنواع المجمعات.

يعطي المنحني المميز لمجمع شمسي العلاقة بين مردود (كفاءة) المجمع η_k والعامل $x = T_{ent} - T_{amb} / I_k$ بشكل تخطيطي، وبمساعدة المنحني المميز للمجمع يمكن تحديد القيم المميزة له أي: للردود البصري الفعال $F_R (\tau \alpha)_n$ عند السقوط الشاقولي للإشعاع كمحور صفري للمنحني المميز وعامل ضياع الحرارة الإجمالي $K_k F_R$ كمناس لزواوية الميل. يبين الشكل (3.10) المنحنيات المميزة لأنواع مختلفة من المجمعات (مجمع مسطح، مجمع الأنابيب المفرغة، المركّز مقعر، أي بسطح

داخلي على شكل قطع مكافئ) في مجال القيم الصغيرة لـ x (أقل من $0.2 \text{ m}^2\text{K/W}$). عند درجات الحرارة العالية تختلف المنحنيات المميزة عن الخط المستقيم (وخاصة للمجمعات المفرغة والمجمعات المركزة).

تُحسب الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_k لمجمع مركّز كما يلي [11]:

(11.10)

$$Q_k = F_R A_a [I_{Dk} \eta_{opt} - (K_k / C) (T_{ent} - T_{amb})]$$

حيث: F_R عامل طرح الحرارة من المجمع

A_a مساحة سطح الفتحة غير المعرضة للظل

I_{Dk} شدة الإشعاع المباشر على فتحة المجمع [W/m^2]

η_{opt} المردود البصري للمجمع [$\text{W/m}^2\text{K}$]

C نسبة تركيز المجمع

T_{ent} , T_{amb} درجة حرارة الدخول، ودرجة الحرارة المحيطة [$^\circ\text{C}$].

يُعرف المردود البصري لمجمع مركّز بأنه نسبة شدة الإشعاع الشمسي المُمتص إلى شدة الإشعاع الشمسي المباشر الساقط:

(12.10)

$$\eta_{opt} = \eta_{opt,0} K_{opt} = \rho \gamma \tau \alpha_a K_{opt}$$

حيث: $\eta_{opt,0}$ المردود البصري للمجمع عند زاوية السقوط 0° للإشعاع المباشر

K_{opt} عامل تصحيح عند اختلاف زاوية السقوط عن الصفر (0°)

ρ درجة العاكسية للمرآة

γ عامل الانقاس (التلقي)

τ درجة إرسال (نقل) الغطاء الشفاف للمُمتص.

α_a درجة امتصاص المُمتص.

أما مردود المجمع المركّز فيحسب كما يلي [11]:

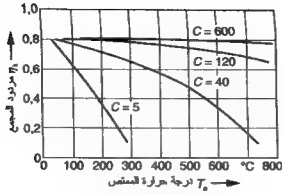
$$\eta_k = Q_k / A_a I_{Dk}$$

(13.10)

$$= F_R \eta_{opt} - (F_R K_k / C I_{Dk}) (T_{ent} - T_{amb})$$

يبين الشكل (4.10) مردود مجمع مركّز وعلاقته بدرجة حرارة المُمتص T_a وبنسبة التركيز C

(من 5 حتى 600).



الشكل 4.10 : علاقة مردود المجموع المركز بدرجة حرارة الممتص T_e ونسبة التركيز (Concentration ratio)

درجة حرارة خروج الحامل الحراري في المجموع مهما كان نوعه تحسب كما يلي:

(14.10)

$$T_{\text{exit}} = T_{\text{ent}} + Q_k / (m C_p)$$

حيث: Q_k الاستطاعة الحرارية المفيدة للمجموع [W]

m التدفق الكتلي للحامل الحراري [kg/s]

C_p السعة الحرارية النوعية للحامل الحراري [J/kgK].

يبين الجدول (1.10) قيماً نظمية لأنواع المختلفة من المجمعات الشمسية.

الجدول 1.10: قيم نظمية (مرجعية) لأنواع مختلفة من المجمعات الشمسية.

نوع المجموع	$F_R \alpha^*$	$F_R R_g^{**}$	درجة حرارة التشغيل °C	التكاليف *** DM/m ²
مجمع مسطح				
— بدون غطاء شفاف	0.9	20-15	30	250-200
— مع صفيحة زجاجية	0.8	4-3.5	أقل من 100	700-500
مجمع ذو أنابيب عملاء (مفرغة)	0.7	1.8-1.5	أقل من 250	1500-1000
مركز ذو شكل قطع مكافئ	0.8	0.7-0.2 ***	400	حوالي 1000

* المرود البصري الفعال للمجموع.

** عامل ضياع الحرارة الفعال للمجموع.

*** منسوباً إلى 1 m² من سطح الفتحة (عند نسبة تركيز C قيمتها بين 20 و 100).

**** DM تعني مارك ألماني (الترجم).

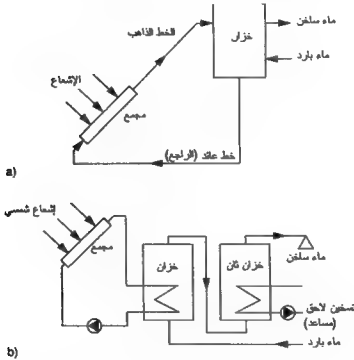
المنشآت الشمسية الحرارية

تستخدم المنشآت الشمسية ذات درجات الحرارة المنخفضة على سبيل المثال في تدفئة مياه المسابح (درجة الحرارة بين 23 و 30 °C) وفي تسخين المياه (45 حتى 60 °C) وللتدفئة (T_p بين 30 و 90 °C) وإنتاج العروة (التبريد) أقل من 10 °C).

إن تسخين المياه هو الاستخدام الأكثر انتشاراً للطاقة الشمسية. يبين الشكل (5.10) نوعين من المنشآت الشمسية لتسخين المياه:

□ المنشأة التي تعتمد على قوة الثقالة وذات الدورة الأحادية، من أجل التشغيل عندما تكون درجة حرارة الوسط الخارجي أعلى من 0 °C.

□ المنشأة الشمسية ذات الجريان القسري الثنائية الدورات لتسخين المياه في الصيف والشتاء.



الشكل 5.10 : منشأة شمسية لتسخين المياه الساخن (a) جريانها يعتمد على قوة الثقالة وذات دورة أحادية، (b) ذات جريان قسري ودورتين.

تتألف المنشأة البسيطة التي تعتمد على قوة الثقالة من مجمع وخزان ماء ساخن وأنابيب للذهاب والإياب. إلى جانب المركبات السابقة تتضمن المنشأة ذات الجريان القسري بدورتين مضخة تحريك

ونظام تحكم بالإضافة إلى مبادل حراري، لأنه يستخدم في الجمع ناقل حراري لا يتجمد، ويستخدم الماء في الخزان. ولضمان تحضير الماء الساخن يُضاف للمنشأة جهاز للتسخين الإضافي. هناك أنواع أخرى من المعدات الشمسية التي جرى وصفها بشكل مفصل في [11]. يعرض المثال (1.10) حساباً مبسطاً لسطح الجمع المستخدم لتحضير الماء الساخن في منشأة شمسية.

مثال 1.10

- يُطلب حساب مساحة سطح الجمع في منشأة شمسية لتحضير الماء الساخن.
- في موقع تركيب للمنشأة يمكن قبول المواصفات التالية للمنطقة للمنشأة التي يجري اختيارها:
- الإشعاع الشمسي اليومي في مستوي الجمع المائل السطح هو $E = 5 \text{ kWh/m}^2\text{d}$.
 - الاستهلاك اليومي للماء الساخن $m_{ww} = 1000 \text{ kg/s}$.
 - درجة حرارة الماء الساخن $t_{ww} = 45^\circ\text{C}$ والماء البارد $t_{cw} = 14^\circ\text{C}$.
 - السعة الحرارية النوعية للماء $c_{pw} = 1.163 \text{ Wh/kgK}$.
 - المردود الوسطي للجمع (بحسب الخبرة) $\eta_k = 48\%$.

الحل:

1. الاستهلاك اليومي للحرارة

$$Q_{ww} = m_{ww} c_{pw} (t_{ww} - t_{cw})$$

$$= 1000 \text{ kg/d} \times 1.163 \text{ Wh/kgK} (45 - 14) \text{ K} = 36053 \text{ Wh/d}$$

2. لحساب الكسب الحراري اليومي للمنشأة الشمسية لكل m^2 من سطح الجمع:

$$Q_{sol} = E \eta_k = 5 \text{ kWh/m}^2\text{d} \times 0.48 = 2.4 \text{ kWh/m}^2\text{d}$$

3. للمساحة اللازمة لسطح الجمع:

$$A = Q_{ww} / Q_{sol} = 36053 \text{ Wh/d} / 2400 \text{ Wh/dm}^2 = 15 \text{ m}^2$$

2.10 المنشآت الحرارية الشمسية لتوليد الكهرباء

Solar Thermal Power Generation

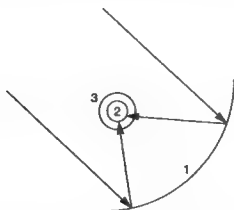
تقوم هذه المنشآت أولاً بتحويل الطاقة الشمسية إلى حرارة ثم إلى عمل ميكانيكي. وللحصول على مردود عالٍ تستخدم مجمعات شمسية مركزة. للحصول على القوة الميكانيكية ثم توليد

الكهرباء تستخدم بشكل رئيسي مزارع شمسية أو أبراج شمسية. ويتم تحويل الطاقة الشمسية إلى كهربائية في خلايا شمسية.

إن المواقع الأنسب لهذه المنشآت هي المناطق المشمسة التي يفوق الإشعاع الشمسي فيها 1600 kWh/m² وعلى مدى 2400 حتى 3400 ساعة في العام، ومنشآت توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية ملائمة للبلدان المجاورة للحزام الصحراوي في أفريقيا، أستراليا، الشرق الأوسط، وسط آسيا، كاليفورنيا (USA)، بلدان البحر الأبيض المتوسط (جنوب أوروبا، شمال أفريقيا)، أمريكا اللاتينية، الصين والمهند.

محطات توليد الكهرباء باستخدام المزارع الشمسية

تتألف المحطة من مجموعة من المرايا الشمسية الموصولة على التوازي المربوطة بمحطة توليد طاقة تقليدية. تتألف المجموعة الواحدة من مركز مقعر على شكل قطع مكافئ موجه ومن أنبوب امتصاص يجري فيه وسيط العمل المتوضع في غلاف زجاجي مفرغ من الهواء (الشكل 6.10). تعرف نسبة التركيز C لمجموع بأنها النسبة بين مساحة الفتحة (الفجوة) A_a ومساحة الامتصاص A_{abs} . وتصل هذه النسبة في المجموع المقعر الذي يأخذ شكل قطع مكافئ 20 حتى 100، وبذلك يمكن تسخين وسيط العمل (زيت حراري أو بخار ماء) حتى 350 إلى 400 °C.



الشكل 6.10 : المركز المقعر بشكل قطع مكافئ (1) وأنبوب الامتصاص (2) مع الغلاف الزجاجي المفرغ من الهواء (3).

مثال 2.10

يُطلب حساب الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_k وكذلك درجة حرارة الخروج لوسيط العمل T_{ext} في مركز بشكل قطع مكافئ. شدة الإشعاع المباشر في مستوى الجمع تبلغ $I_{\text{Dk}} = 750 \text{ W/m}^2$ والمردود البصري $\eta_{\text{opt}} = 0.74$. مساحة الفجوة التي تتعرض للظل $A_n = 240 \text{ m}^2$ ، نسبة التركيز $C = 40$. درجة حرارة دخول الناقل الحراري $T_{\text{ent}} = 280^\circ\text{C}$ وتدفقه الكتلي $m = 0.6 \text{ kg/s}$ وسعته الحرارية النوعية $C_p = 3200 \text{ kJ/kgK}$. درجة حرارة الوسط المحيط $T_{\text{amb}} = 30^\circ\text{C}$. عامل نفوذ الحرارة الإجمالي $K_k = 7 \text{ W/m}^2\text{K}$ وعامل تصريف الحرارة للمجمع $F_R = 0.96$.

الحل

الاستطاعة الحرارية المفيدة للمجمع

$$Q_k = F_R A_n [I_{\text{Dk}} \eta_{\text{opt}} - (K_k / C) (T_{\text{ent}} - T_{\text{amb}})]$$

$$= 0.96 \times 240 [750 \times 0.74 - (7 / 40) (280 - 30)] = 117792 \text{ W}$$

درجة حرارة خروج الناقل الحراري من المجمع:

$$T_{\text{exit}} = T_{\text{ent}} + Q_k / (m c_p)$$

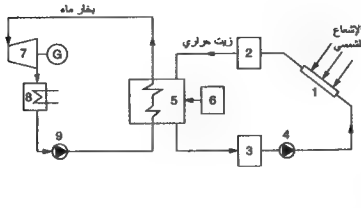
$$= 280 + 117792 / (0.6 \times 3200) = 341.35^\circ\text{C}$$

أصبحت المنشآت التي تستخدم المزارع الشمسية ناضجة من الناحية الهندسية ومناسبة اقتصادياً، وهي في الوقت الحاضر النوع الوحيد من المنشآت الحرارية الشمسية الرائجة تجارياً.

تمّ في صحراء Mojave في كاليفورنيا، التي يصل فيها الإشعاع الوسطي السنوي إلى 2400 kWh/m^2 ، منذ عام 1984 تركيب 9 محطات شمسية تجارية لتوليد الكهرباء ذات مجمعات مقعرة على شكل قطع مكافئ واستطاعتها الإجمالية 354 MW ، وسميت المنشآت بـ (Solar SEGS Electric Generating Systems) أي المجموعة الشمسية لتوليد الكهرباء، وتبلغ كلفة الكهرباء التي تولدها هذه المجموعة الشمسية 0.19 إلى 0.14 DM/kWh [5].

يبين الشكل (7.10) محطة توليد للكهرباء عن طريق مزرعة شمسية. يتألف الجزء الشمسي من حقل من المجمعات التي تأخذ شكل قطع مكافئ بالإضافة إلى خزاني حرارة. يستخّن وسيط العمل في المجمعات (الوسيط هو زيت حراري) ثم يرسل إلى مولد بخار. ثم يحصل تحول آخر للطاقة في

العنفة البخارية مع المولد. تركب معدلات حرق إضافي، يتم فيها حرق الغاز الطبيعي، بحيث يكتمل بذلك عمل المنشأة.



- 1 حقل مجمعات على شكل قطع مكافئ
- 2 صهريج تخزين (حار)
- 3 صهريج تخزين (بارد)
- 4 مضخة للزيت الحراري
- 5 مولد بخار مع محمض
- 6 سخّين إضافي (إحراق غاز طبيعي)
- 7 عجلة بخارية مع مولد مكثف
- 8 مضخة تغذية

الشكل 7.10 : مخطط وصل محطة توليد الكهرباء باستخدام مزرعة شمسية.

وبين الجدول (2.10) المواصفات الفنية للمنشأة SEGS VII و VIII التي استطاعتها الكهربائية 30 و 80 MW [5].

الجدول 2.10: المواصفات الفنية محطة توليد الطاقة باستخدام المزرعة الشمسية SEGS VII و VIII في كاليفورنيا.

VIII	VII	SEGS
80	30	الاستطاعة الكهربائية MW
37.6	37.5	المردود الحراري %
464	194	مساحة فتحة المجموع $[10^3 \text{ m}^2]$
53	43	مردود الحقل [%]
253	93	الإنتاج السنوي الصافي $[\text{GWh/a}]$
0.14	0.19	تكلفة إنتاج الكهرباء $[\text{DM/kWh}]$

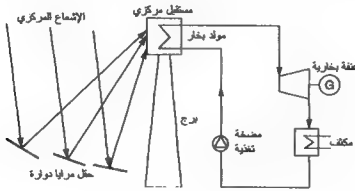
يمكن أن يصل المردود السنوي الإجمالي إلى 15 %. تعمل هذه المنشآت بشكل متجانس (مشارك) (Hybrid)، حيث تساهم الكمية الإضافية من الوقود (الغاز) التي تحرق في هذه المنشأة فقط بنسبة 25 %.

يصل التشغيل الشمسي الصافي إلى 1800 ساعة في العام، ويتراوح عدد الساعات الإجمالي لعمل المنشأة في العام بين 3147 و 3169 h/a [5].

محطات توليد الكهرباء باستخدام الأبراج الشمسية

يبين الشكل (8.10) مخطط وصل محطة توليد باستخدام الأبراج الشمسية، وتتألف المنشأة من جزء شمسي وجزء يحوي محطة توليد كهرباء تقليدية. يتضمن الجزء الشمسي حقل مرايا دوارة (Heliostats) ومستقبل إشعاع (مستقبل مركزي) (receiver) يركب على ذروة العرج، وربما خزان حرارة. تتألف المرآة الدوارة (Heliostat) التي تعكس الشمس في اتجاه واحد من مرآة مسطحة سطحها 25 إلى 150 m^2 .

يتم تركيز الإشعاع الشمسي المباشر الساقط بواسطة حقل المرايا الدوارة على المستقبل المركزي. تتطلب المرايا الدوارة العاكسة توجيهاً مستمراً بواسطة محور مزدوج. يتم توجيه كل مرآة عاكسة بواسطة حاسوب (كومبيوتر)، بحيث تتناسب زاوية ميلها وتوجيهها مع ارتفاع الشمس في الأوقات المختلفة.



الشكل 8.10 : مخطط وصل محطة توليد الكهرباء ذات العرج الشمسي.

تحدد الاستطاعة الحرارية لمنشأة ذات برج شمسي بالإشعاع ومساحة سطح المرايا الدوارة والضغوطات الحرارية. وتتراوح درجة حرارة الممتص الأعظمية بين 400 و 1000 $^{\circ}C$ ، أما درجة التركيز C أي النسبة بين المساحة الإجمالية لسطوح المرايا ومساحة سطوح اللواقط فهي تتراوح بين بضعة مئات و 1500.

يستخدم بخار الماء والهواء والمعادن السائلة (الصوديوم) والأملاح العضوية المذابة كحوامل حرارية. تُشغل عنفة بخارية بواسطة الوسيط العامل المُسخَّن في الممتص (بخار الماء).

وقد تم حتى الآن تركيب 7 منشآت تجريبية بأبراج شمسية ذات استطاعة كهربائية 18 MW [11] ومنها منشأة واحدة باستطاعة 10 MW في كاليفورنيا (Solar One) تم إيقافها عن العمل قبل عدة سنوات.

بين الجدول (3.10) المواصفات الفنية للمنشأة ذات البرج الشمسي CESA-1 باستطاعة كهربائية 1.2 MW في Almeria (إسبانيا).

يستخدم كحامل حراري في المجمّع بخار الماء، ويستخدم الملح كوسيط تخزين في خزانات الحرارة التي سعتها التخزينية 2.7 MWh (مُحوّلةً إلى ما يكافئها من إنتاج الطاقة الكهربائية). يتم في المستقبل المركزي توليد بخار ماءٍ عمّص بضغط 100 bar ودرجة حرارة 520 °C. يبلغ المردود الإجمالي للمنشأة ذات البرج الشمسي SSPS/CRS في Almeria حوالي 7 %.

الجدول 3.10: المواصفات الفنية للمنشأة ذات البرج الشمسي CESA-1

المميزات	القيمة
الاستطاعة الشمسية، MW	5.5
الاستطاعة الحرارية، MW	4.95
الاستطاعة الكهربائية، MW	1.2
مساحة سطوح المرايا الدوّارة، $10^3 m^2$	حوالي 12
ارتفاع البرج، m	80

في المشروع الأوروبي Phoebus (الاستطاعة الكهربائية تبلغ 30 MW) وفي المشروع الشمسي 100 (استطاعته 100 MW) في جنوب أوروبا يُتَنتَظر الوصول إلى مردود إجمالي قدره 15 % وبحيث تكون تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية أقل من 0.2 DM/kWh.

تستخدم كمستقبلات مركّبة في أكثر الأحيان مستقبلات مفتوحة أو مستقبلات ذات حجرة فارغة. يُسخّن الإشعاع الشمسي المتصّل الحامل الحراري في حزمة أنابيب، تستخدم من أجل درجات الحرارة التي تصل إلى 550 °C المناسبة لعملية البخار مستقبلات أسطوانية. أما من أجل محطات توليد الطاقة الكهربائية باستخدام النفايات الغازية فتلزم درجات حرارة تصل إلى 1000°C، وهنا يناسب المستقبل ذو الحجرة الفارغة الذي يتمتع بنسبة عالية بين ارتفاع البرج ومساحة حقل المرايا الدوّارة، ويصنع البرج إما من الفولاذ أو من الإسمنت المسلح بالفولاذ. تناسب في المواقع القريبة من خط الاستواء المستقبلات المفتوحة مع المرايا الدوّارة حول البرج، وعند درجات العرض الأعلى تُركّب المستقبلات ذات الحجرة الفارغة مع حقل شمالي أو جنوبي في النصف الشمالي أو

الجنوبي للكرة الأرضية. تتعلق مساحة حقل المرايا العاكسة بالاستطاعة الكهربائية P_{el} ، فعندما تكون الاستطاعة 20 أو 100 MW فإن المساحة اللازمة تكون 0.5 أو 3.3 km² [15].
 إن سبب الضياعات الحرارية هو الانعكاس الناقص وأخطاء الإنتاج والتركيب وتعرض المرايا الدوارة العاكسة للظّل. يتراوح مردود حقل المرايا العاكسة η_{hr} ، والذي يُعرف بأنه النسبة بين الشعاع الساقط على سطح الممتص والإشعاع المباشر على المرايا الدوارة، بين 55 و 80%.
 تحسب الاستطاعة المفيدة اللحظية للإشعاع من أجل حقل مرايا دوارة مساحته الإجمالية A_{hr} كما يلي:

$$E_{t_n} = A_{hr} I_{Dn} \eta_{hr} \quad [W] \quad (15.10)$$

حيث: I_{Dn} كثافة الإشعاع المباشر على السطح العمودي على الإشعاع [W/m²].
 η_{hr} مردود (كفاءة) حقل المرايا العاكسة الدوارة.

كفاءة (فعالية) المنشآت الحرارية الشمسية في توليد الكهرباء
 تحسب الاستطاعة المفيدة للإشعاع Q_0 من أجل حقل مجمعات في منشأة ذات مزرعة شمسية تحوي n مجعماً على شكل قطع مكافئ كما يلي:

$$Q_0 = n I_D A_a \eta_{hr} \quad (16.10)$$

حيث: A_a سطح الفتحات لمجموعة المجمعات [m²]
 I_D شدة الإشعاع المباشر في المستوى المائل للفتحة [W/m²]
 η_{hr} مردود حقل المجمعات.
 يُحسب مردود مجموعة المجمعات التي تأخذ قطع مكافئ كما يلي:

$$\eta_k = \rho \sigma_{abs} - (K_k/C I_D) (T_{abs} - T_{amb}) - (\epsilon_{abs} \sigma / C I_D) (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (17.10)$$

حيث: ρ درجة الانعكاس في العاكس أو الممتص
 σ_{abs} أو ϵ_{abs} درجة امتصاص الممتص أو درجة إصداره
 K_k عامل نفوذ الحرارة [W/m²K]
 C نسبة التركيز
 T_{abs} أو T_{amb} درجة حرارة الممتص أو الوسط الخارجي [K].

تعتمد الاستطاعة المفيدة $E_{f,u}$ لحقل مرابا عاكسة دوارة في مستقبل مركزي محطة توليد كهرباء ذات برج شمسي، باعتبارها الاستطاعة الحرارية Q_u المفيدة لتسخين وسيط العمل. يذهب جزء من الإشعاع إلى الوسط المحيط ضياعاً. تتألف ضياعات الطاقة من المستقبل إلى الوسيط المحيط من ضياعات الانعكاس $E_{\text{loss,r}}$ والضياعات الحرارية بفعل الحمل ($Q_{\text{loss,c}}$) والإشعاع ($Q_{\text{loss,r}}$). والتوصيل عند عملية التحويل في للمستقبل ($Q_{\text{loss,cond}}$).
وتصبح الاستطاعة الحرارية المفيدة Q_u للممتص:

$$(18.10) \quad Q_u = E_{f,u} - E_{\text{loss,r}} - (Q_{\text{loss,c}} + Q_{\text{loss,r}} + Q_{\text{loss,cond}}) \quad [\text{W}]$$

وكذلك:

$$(19.10) \quad \begin{aligned} Q_u &= F_R A_a [I_a - K_k (T_{\text{ent}} - T_{\text{amb}}) A_f / A_a] \\ &= m (h_{\text{exit}} - h_{\text{ent}}) \quad [\text{W}] \end{aligned}$$

حيث: F_R عامل تصريف الحرارة

A_a مساحة فتحة المستقبل $[\text{m}^2]$

I_a استطاعة الإشعاع الشمسي الممتصة في كل 1 m^2 من مساحة الفتحة $[\text{W}/\text{m}^2]$

K_k عامل نفوذ الحرارة الإجمالي للمستقبل $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$

T_{ent} و T_{amb} درجة حرارة الدخول إلى المجموع ودرجة حرارة الوسط الخارجي $[\text{K}]$

A_f مساحة حقل المرابا العاكسة الدوارة $[\text{m}^2]$

m التدفق الكتلي للحامل الحراري في الممتص $[\text{kg}/\text{s}]$

h_{ent} ، h_{exit} الإنتالي عند الدخول أو الخروج للحامل الحراري $[\text{J}/\text{kg}]$

تحسب استطاعة الإشعاع الشمسي الممتص كما يلي:

$$(20.10) \quad I_a = (E_{f,u} - E_{\text{loss,r}}) / A_a = I_{\text{Dn}} \rho (\gamma \tau \alpha) K_{\text{opt}} \quad [\text{W}/\text{m}^2]$$

حيث: I_{Dn} كثافة الإشعاع المباشر الساقط بشكل عمودي

ρ درجة الانعكاس للممتص

γ درجة الالتقاط للممتص

τ درجة إرسال (نقل) الغطاء الشفاف للمستقبل ($\tau = 1$) عندما لا يُستخدم غطاء)

α درجة امتصاص الممتص

K_{opt} عامل تصحيح تغير المردود للمجموع مع الزمن.

عامل الانكسار γ للممتص هو نسبة الإشعاع المنعكس من المرايا الدوارة العاكسة إلى الإشعاع الذي يسقط على الممتص.
مردود المستقبل هو:

$$(21.10) \quad \eta_R = Q_u / E_{fu}$$

حيث: E_{fu} استطاعة الإشعاع المفيدة لحقل المرايا العاكسة الدوارة [W].
وبحسب تيار الضياع الحراري $Q_{los,c}$ بالحمل في المستقبل كما يلي:

$$(22.10) \quad Q_{los,c} = \alpha_c A_{abs} (T_{abs} - T_{omb}) \quad [W]$$

حيث: α_c عامل انتقال الحرارة بين فتحة الامتصاص والوسط المحيط (6 حتى $18 \text{ W/m}^2\text{K}$)

A_{abs} مساحة سطح الممتص [m^2]

T_{omb} و T_{abs} درجة حرارة الممتص والوسط المحيط [K].

أما تيار الضياع الحراري $Q_{los,cond}$ بفعل التوصيل الحراري فهو صغير عندما يكون هناك عزل جيد للمستقبل وهو بحسب كما يلي:

$$(23.10) \quad Q_{los,cond} = A_{abs} (T_{abs} - T_{omb}) / [(\delta / \lambda)_w + (\delta / \lambda)_i 1 / \alpha_p] \quad [W]$$

حيث: δ_w و δ_i سماكة الجدار والعازل [m]

γ_w و λ_w عامل التوصيل الحراري لمادة الجدار والعازل [W/mK]

α_p عامل انتقال الحرارة للسطح الخارجي للممتص [W/m²K].

لحساب تيار الضياع الحراري $Q_{los,R}$ بفعل الإشعاع والانعكاس:

$$Q_{los,R} = \rho E_{fu} / [1 - \rho(1 - r_f)] + A_{abs} \epsilon \sigma (T_{abs}^4 - T_w^4)$$

$$(24.10) \quad 1 / [1 - \rho(1 - \epsilon)(1 - r_f)] \quad [W]$$

حيث: E_{fu} استطاعة الإشعاع المفيدة لحقل المرايا العاكسة الدوارة [W]

ρ درجة الانعكاس الفعالة والممتص

r_f نسبة سطحي الفتحة والممتص للمستقبل المركزي

ϵ درجة الإصدار للممتص في مجال للموجات الطويلة $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

يكون المستقبل المفتوح في تبادل مباشر بالإشعاع مع الوسط المحيط ويكون فيه $r_f = 1$ ، أما

الضياعات الحرارية بالإشعاع والانعكاس فهي:

$$(25.10) \quad Q_{R,r} = \rho E_{fu} + A_{abs} \epsilon \sigma (T_{abs}^4 - T_{omb}^4) \quad [W]$$

مجموعة صحن ستيرلينغ Dish-Stirling

تتألف الجملة الشمسية ذات الصحن الذي يأخذ شكل جسم مكافئ دوراني (Paraboloid) بالإضافة إلى محرك ستيرلينغ من مرآة مقعرة تأخذ شكل جسم مقعر دوراني (صحن) ومستقبل للإشعاع (مستقبل) ومحرك احتراق (محرك ستيرلينغ ذي غاز ساخن) يمكن وصله بمولد كهربائي. وهذه المنشآت أعلى مردود لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة ميكانيكية وكهربائية. تُركَّب مثل هذه المنشآت باستطاعة كهربائية إجمالية قدرها 8 MW. وهناك في الولايات المتحدة مُركَّبات قطرها بين 7 و 12 m ونسبة التركيز فيها C تتراوح بين 240 و 2500. تصل درجة حرارة المنتص T_m القيمة 300 حتى 800 °C ومردود المُرَكَّب 63 حتى 77%.

وتم منذ آذار (مارس) 1992 في Almeria (إسبانيا) بشكل متواصل تشغيل ثلاث مجموعات ذات صحن ومحرك ستيرلينغ من الجيل الثالث أنتجتها شركة SBP (ألمانيا في مدينة Stuttgart) (الشكل 9.10) [11]. يبين الجدول (4.10) للمواصفات الفنية لهذه المنشأة.



الشكل 9.10 : مخطط جملة الصحن (الذي يأخذ شكل جسم مقعر دوراني) ومحرك ستيرلينغ. تصل الاستطاعة التصميمية الكهربائية لجملة الصحن ومحرك ستيرلينغ إلى 9 kW عندما يكون الإشعاع 1000 W/m^2 . تُوجَّه المرآة التي شكلها جسم مقعر دوراني نحو الشمس عن طريق محورين، بحيث تصل نسبة التركيز إلى 4000 يعمل محرك ستيرلينغ من النوع V-160 من صنع شركة SOLO (في مدينة Stuttgart بألمانيا) بواسطة الهيليوم كعنصر عمل، ويصل مردوده الحراري عند 40 إلى 150 bar و 250 و 650 °C حتى 33%. تم التوصل حتى الآن إلى 7.8 kW ومردود إجمالي قدره 21%. عند نسب تركيز عالية (حتى 4000) ودرجات حرارة عالية في المجال من 700 إلى 900 °C يمكن أن يرتفع المردود الحراري حتى 40% والمردود الإجمالي ليصل 23 إلى 25%. إذا أمكن التوصل إلى تصنيع صحن بكلفة منخفضة، وتحقق تحسين تصميمي لا مركزي في المناطق الجنوبية المعزولة والبعيدة وبشكل اقتصادي. أي أنه يجب تخفيض تكاليف الاستثمار الحالية التي تتراوح بين 12500 و 37000 DM لتصبح 3000 DM لكل 1 kW.

المجدول 4.10: المواصفات الفنية لجملة الصحن (شكله جسم مكافئ دوراني) وعمره

ستروينغ

القيمة	المقدار المميز
9	الاستطاعة الكهربائية (عند الإشعاع $1000\text{W/m}^2\text{K}$) [kW]
25	المردود [%]
حتى	المرآة المقعرة التي تأخذ شكل جسم مكافئ دوراني (الصحن)
غشاء من الفولاذ الجيد سماكه 0.2 mm مع مرآة زجاجية رقيقة	
7.5	القطر [m]
5	البعد المحرقى [m]
44	المساحة [m ²]
4000	نسبة التركيز

محطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد

تتألف المنشأة من مسخن هواء شديد البساطة كبير المساحة، ومدخنة وعنفه هوائية (الشكل

10.10).

يتسخن الهواء بسبب الإشعاع الشمسي الموارد عبر القبة التي تسمح بنفوذ الضوء، فيصعد ماراً في المدخنة وعابراً العنفه الهوائية. تتحدد قوة الرفع بواسطة فرق الكثافة بين الهواء البارد والساخن بالإضافة إلى ارتفاع المدخنة. تنشأ قوة الرفع بفعل فرق الضغط الذي يؤدي إلى جريان الهواء، ويحسب فرق الضغط بالنسبة لـ 1 m^2 كما يلي:

$$\Delta p = g H (\rho_c - \rho_w) \quad [\text{N/m}^2] \quad (26.10)$$

حيث: g التسارع الأرضي $[\text{m/s}^2]$ (قيمه 9.81)

H ارتفاع المدخنة [m]

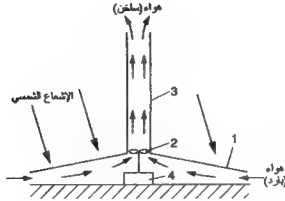
ρ_c الكتلة النوعية للهواء البارد عند درجة الحرارة المحيطة $[\text{kg/m}^3]$

ρ_w الكتلة النوعية للهواء الدافئ عند درجة حرارة المدخنة الوسطية $[\text{kg/m}^3]$.

تتحول طاقة الضغط إلى طاقة حركية للهواء الجاري. يمكن حساب سرعة الهواء في المدخنة من

معادلة برنولي:

$$w = \sqrt{2 \Delta p / \rho_w} \quad [\text{m/s}] \quad (27.10)$$



1. غطاء شفاف
2. عفة هوائية
3. منخل
4. مولد كهربائي

الشكل 10.10 : مخطط محطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد.

تُحسب استطاعة العنفة الهوائية بالاستعانة بسرعة الهواء ومساحة مقطع المدخنة بطريقة مماثلة للعنفات الريحية (انظر الفقرة 2.12).

أما مردود محطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد فينتج من العلاقة:

(28.10)

$$\eta = P_T / I_A$$

حيث: P_T استطاعة العنفة الهوائية [W]

I شدة الإشعاع العام [W/m²]

A مساحة سطح مجمع تسخين الهواء [m²].

أنشئت أول محطة من هذا النوع في إسبانيا وتعمل منذ عام 1981، ومواصفاتها الفنية التفصيلية مبينة في الجدول (5.10).

الجدول 5.10: المواصفات الفنية لمحطة توليد الكهرباء ذات تيار الهواء المتصاعد في إسبانيا.

المعطيات	القيمة
الاستطاعة الاسمية، kW	50
نصف قطر المجمع الشمسي، m	122
ارتفاع المدخنة وقطرها، m	10، 200
قطر العنفة، m	10
سرعة الهواء في المدخنة، m/s	7.6
إنتاج الطاقة الكهربائية، MWh/a	42
المردود الإجمالي، %	0.05

محطة توليد الكهرباء باستخدام حرارة مياه البحار

تم تجريب أول منشأة من هذا النوع باستطاعة قدرها 40 kW عام 1930 في كوبا. عن طريق امتصاص الأشعة الشمسية يصبح الماء المخازر للسطح الخارجي في المحيط دافئاً، وذلك في المناطق الاستوائية، وتصل درجة حرارته في الشتاء إلى 250 °C وفي الصيف إلى 30 °C. تمتد هذه المنطقة من خط العرض 35° شمال خط الاستواء حتى خط العرض 30 °C جنوباً. وعلى عمق 500 m تكون درجة حرارة الماء ثابتة وتبلغ 5 إلى 8 °C. يمكن تحويل الطاقة الشمسية ترموديناميكاً إلى طاقة كهربائية، وأكبر مردود حراري ينتج باستخدام دورة كارنو بين درجة حرارة الماء عند طبقة السطح الخارجي (T_m) وعند العمق (T_l) للمحيط المداري:

(29.10)

$$\eta_{th} = 1 - T_l / T_m$$

بحسب مردود محطة من هذا النوع من القيمتين $\eta_{th,c}$ ودرجة الجودة η_{Good} .

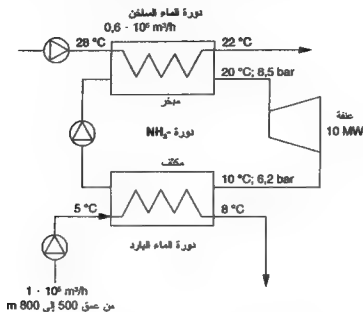
(30.10)

$$\eta_{PS} = \eta_{th,c} \eta_{Good}$$

يمكن لقيمة η_{PS} أن تصل 3 إلى 4 %.

يسقط على بحار الكرة الأرضية 4/5 مما يسقط من الإشعاع الشمسي الإجمالي الذي يسقط على سطح الأرض، وهذا يعادل تياراً حرارياً في العام الواحد قدره 0.85×10^{18} kWh/a. يسقط يومياً على كل متر ربع في المنطقة القريبة من خط الاستواء 17 إلى 20 MJ/m²d، وتبلغ كثافة الاستطاعة 12 W لكل m² من مساحة سطح البحار. يستخدم مفهوم (Ocean Thermal energy OTEE conversion) أي (تحويل الطاقة الحرارية للمحيط) لتوليد الكهرباء من حرارة الماء (البحر)، والمخطط الذي يبين مبدأ عمل هذه المحطة مبين على الشكل (11.10). تتألف المحطة من مبخّر وعنفة بخارية ومكثف، ومضخة، ويستخدم كوسيط عمل الأمونياك. تضاف إلى المبخر حرارة السطح الخارجي للماء (درجة الحرارة تتراوح بين 27 و 30 °C) ويستخدم كوسيط تبريد الماء البارد (درجة حرارته بين 5 و 8 °C) للسحب من عمق 500 حتى 800 m. من أجل استطاعة كهربائية قدرها 20 MW يجب أن يمرر على المبخر والمكثف كميات متساوية تقريباً من الماء الساخن والبارد (حوالي 2000 m³/h). تبلغ الاستطاعة الحرارية لأول منشأة تجريبية بالقرب من هاواي (USA) 2.8 MW، أما الاستطاعة الكهربائية فتبلغ 50 kW (max). وقد بلغت الاستطاعة

الصفائية 18 kW. يبلغ قطر التمديدات المصنوعة من البولي إيثيلين من أجل الماء البارد 600 mm وطولها 650 m. كما يوجد في اليابان منشأة استطاعتها الكهربائية 100 kW.



الشكل 11.10 : مخطط منشأة توليد الكهرباء باستخدام حرارة ماء المحيط.

يمكن استخدام التيار المُولَّد لإنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء. تكاليف الاستثمار هنا أقل من التكاليف في محطات التوليد التقليدية الحرارية والنووية، وتكاليف الكهرباء حوالي 0.04 DM/kWh عند خرج المحطة. إن أفضل شكل لنقل الطاقة إلى مواقع الاستهلاك هو نقل الهيدروجين إليها.

مثال 3.10

ما هو مردود محطة توليد الكهرباء باستخدام حرارة ماء المحيط عندما تكون درجة حرارة الماء عند الطبقة السطحية لمحيط استوائي ($T_o = 30^\circ\text{C}$) وفي العمق 8°C ؟ $T_i = 8^\circ\text{C}$ درجة الجودة للمحطة $\eta_{\text{Good}} = 0.5$.

الحل

المردود الحراري لدورة كارنو بين T_o و T_i :

$$\eta_{th,c} = 1 - T_l / T_o$$

$$= 1 - (8 + 273) K / (30 + 273) K = 7.26 \%$$

وبالتالي فمردود محطة توليد الكهرباء باستخدام حرارة ماء المحيط:

$$\eta_{ps} = \eta_{th,c} \eta_{Good} = 0.072 \times 60.5 = 3.63 \%$$

3.10 المنشآت الكهروضوئية Photovoltaics

1.3.10 الخلايا الشمسية، الجملة للشمسية وللمولد الشمسي

الخلية الشمسية

اكتشف التأثير الكهروضوئي (الكهربائي — الضوئي) عام 1839 من قبل العالم Becquerel. يحدث تهييج كهروضوئي لالالكترون عن طريق امتصاص طاقة كم (Quantum) من الضوء $h\nu$. إن الطاقة الحركية الأعظمية للالكترون المنبعث تابع خطي لتردد الضوء ν ، وكثافة تيار الكهرباء بفعل انبعاث (الالكترونات) بتأثير الضوء متناسبه مع شدة الإشعاع الذاتي للضوء، وتحت حد معين للتردد لا يحدث أي انبعاث بتأثير الضوء، وقد اكتشف Bell Telephone في عام 1954 (USA)، مبدأ الخلايا الشمسية. الخلية الشمسية هي أحد عناصر المجموعة الكهروضوئية (PV- System) التي تقوم بالتحويل المباشر لطاقة إشعاع الضوء إلى طاقة كهربائية (تيار مستمر).

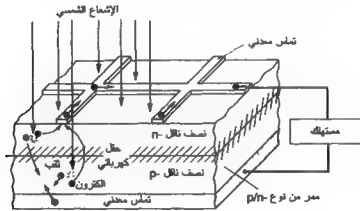
بامتصاص الضوء يتولد في أنصاف النواقل حوامل للشحنة: الالكترونات ذات شحنة سالبة، ومن المواقع غير المشغولة بالإلكترونات تتولد أماكن ذات شحنة موجبة (ثقوب)، ويؤدي ذلك إلى نشوء توتر (جهود) كهربائي.

يتم فصل الالكترونات والثقوب الناشئة عن بعضها البعض بواسطة أنصاف نواقل معينة — عن طريق ممر (سطح انتقال) p/n، وجملة MIS (Metal-Isolator-Semiconductor) أي (معدن — عازل — نصف ناقل) أو عن طريق جملة SIS (Semiconductor-Isolator-Semiconductor) أي (نصف ناقل — عازل — نصف ناقل).

* الكم (Quantum) هو أصغر مقدار من الطاقة يمكن أن يوجد مستقلاً — المترجم

الممر من نوع p/n هو عبارة عن شبكة ثنائية الطبقات يتأخم فيها نصف ناقل n - (مثلاً سيليسيوم مطلي بآثار من الفوسفور) نصف ناقل آخر p - (مثلاً سيليسيوم مطلي بالبور) (الشكل 12.10).

في هذا المجال الحدي، أي الممر p/n يتشكل عند التعريض للضوء حقل كهربائي داخلي. بامتصاص الإشعاع الشمسي تنفصل على جانبي الطبقة الحدية أزواج من الإلكترونات والثقوب، وتنتقل الإلكترونات من نصف الناقل p إلى نصف الناقل n ، أما الثقوب فتنتقل من نصف الناقل n إلى نصف الناقل p ، وذلك لموازنة هبوط حوامل الشحنة في الطبقة الحدية. تحت تأثير الحقل الداخلي تجتمع الإلكترونات في الناقل n والثقوب في الناقل p ، وبذلك ينشأ عند سطوح التماس للمعدن على السطح الخارجي منبع توتر (جهد، ضغط) يعاكس الحقل الداخلي ويساويه. يؤدي هذا الجهد في دارة كهربائية خارجية مغلقة إلى نشوء تيار مستمر.

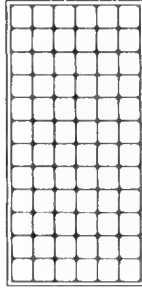


الشكل 12.10 : الخلية الشمسية مع الممر من نوع p/n .

يمكن إنتاج الخلايا الشمسية من أنصاف نواقل مختلفة ومن مركبات أنصاف النواقل. يتعلق الجهد المتولد في الخلايا الشمسية بأنواع مواد أنصاف النواقل المستعملة، وتردد شدة التيار مع شدة الإشعاع والمساحة المعرضة للضوء، وتصل الاستطاعة الأعظمية الممكن الوصول إليها إلى 100 W لكل متر مربع من مساحة الخلية الشمسية. هذا ويتطلب الوصول إلى مردود جيد استعمال أنصاف نواقل شديدة النقاوة وتستخدم حالياً في أغلب الأحيان خلايا شمسية من السيليوم.

الجملة الشمسية والمولد

العنصر الأساسي لمجموعة كهروضوئية PV - System هو الجملة الشمسية (الشكل 13.10). إنه الجزء الأصغر الذي يولد الطاقة الكهربائية والذي يُوصل فيه صف من الخلايا الشمسية خلف بعضها البعض، وتُجمع تحت غطاء شفاف كتيق للهواء بحيث تكون متينة ميكانيكياً. وهكذا يمكن الوصول إلى جهود (توترات، ضغوط) كهربائية واستطاعات عالية. يبلغ الجهد الاسمي للجملة شمسية V 12.



الشكل 13.10 : الجملة الشمسية.

يُصنَّع المولد ذو الخلية الشمسية أو المولد الشمسي عن طريق وصل عدة جمل شمسية ويستخدم لتأمين الطاقة الكهربائية لمستهلك أو أكثر. عند الوصل التسلسلي لعدة جمل عن طريق ربط القطب السالب لجملة مع القطب الموجب للجملة التالية تُضرب قيمة التوتر (الجهد) الاسمي U_n للجملة الشمسية الواحدة بعدد الجمل n وذلك عند نفس تيار الشحن I :

$$U = n U_n \quad (31.10)$$

ينتج الوصل التسلسلي لجلتين كل منهما V 12 ينتج مولداً شمسياً بتوتر (جهد) V 24. لرفع التيار وبالتالي استطاعة مولد شمسي تُربط عدة جمل متساوية التوتر (الجهد) الاسمي U_n على التوازي (التفرع) (كل منها القطب السالب مع القطب السالب والقطب الموجب مع القطب الموجب). وهكذا ينتج تيار الشحن I واستطاعة المولد الشمسي كما يلي:

$$(32.10)$$

$$I = n I_n$$

$$(33.10)$$

$$P = I U$$

الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليوم

يُميز بين ثلاثة أنواع رئيسية من الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليوم، وذلك تبعاً لشكل التبلور (crystalization):

– الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليوم أحادية البلورة.

– الخلايا الشمسية المتعددة البلورات.

– الخلايا الشمسية ذات الطبقة الرقيقة أو غير المتبلورة (amorphous) (اللابلورية).

لإنتاج النوع الأول من الخلايا الشمسية يسحب من مصهور السيليوم ناقل أحادي البلورات من النوع p طوله 2 إلى 3 m وقطره 10 إلى 15 cm، ثم يُقسم بالمنشار إلى شرائح سماكتها 0.3 إلى 0.5 mm. ولتشكيل المر (سطح عبور التيار) p/n يطلى الجانب المواجه للإشعاع الشمسي بطبقة سماكتها 3 إلى 4 mm بالفوسفور. أما استرجار التيار فيتم عبر تماسات من الطبقة المعدنية (على الجانب الأمامي من الشبكة المعدنية الموصلة للتيار). ولكن ينفذ أكبر قدر من الإشعاع الشمسي فلا يجوز لمساحة الشبكة المعدنية أن تغطي أكثر من 10 % من المساحة الإجمالية. تعطي خلية سيليوم شمسية أبعادها 10 × 10 cm وتوتراً (جهداً) كهربائياً قيمته 0.5 V واستطاعة أعظمية قدرها W I عندما تكون شدة الإشعاع 100 W/m². تحاط الخلية الشمسية بغلاف من الزجاج أو البلاستيك بحيث تصبح كثيفة للهواء.

إن مردود خلايا السيليوم الشمسية الأحادية البلورة مرتفع نسبياً (15 إلى 18 %) وهي تستخدم في المحطات الكهروضوئية (PV) المتوسطة والكبيرة.

يشكل السيليوم في الخلايا الشمسية المتعددة البلورات، بلورات عديدة ذات أحجام واتجاهات مختلفة.

تقسم الكتلة التي تتألف من العديد من بلورات السيليوم الصغيرة إلى شرائح لاستخدامها كخلايا شمسية كما هو الحال في الخلايا الأحادية البلورة. يتراوح مردود الخلايا المتعددة البلورات بين 12 و 14 % كحد أعظمي. يبين الجدول (6.II) القيم الأعظمية لمردود مجموعات خلايا السيليوم الشمسية.

الجدول 6.10: المورد الأعظمي لخلايا السيليسيوم الشمسية والمجموعات الشمسية.

نوع الخلية الشمسية	المردود %	الخلية الشمسية	للجملة الشمسية
خلايا السيليسيوم الشمسية الأحادية البلورة	17.8	17.4	
خلايا السيليسيوم الشمسية المتعددة البلورات	13.8	13.4	

يحتاج تصنيع خلايا السيليسيوم البلورية الكثير من العمل والجهد، ويبلغ الزمن اللازم لتغطية كلفتها ثلاثة أعوام. تبلغ تكاليف إنتاجها 12 إلى 20 DM لكل W 1 استطاعة، وتبلغ تكاليف الطاقة الكهربائية المنتجة 0.8 إلى 1.6 DM/kWh مقابل 0.05 إلى 0.15 DM/kWh في محطات الطاقة التقليدية. أما تكاليف خلايا السيليسيوم الشمسية المتعددة البلورات فهي أقل. يتطلب ترريع خلايا السيليسيوم الشمسية البلورية في السوق تخفيض تكاليف إنتاج الطاقة الكهربائية إلى الخمس، وذلك بتبسيط تقنية الإنتاج.

يُيخَّر السيليسيوم في الخلايا الشمسية اللابلورية من مركب غازي مثل SiH_4 (Silan) على مادة حاملة كالزجاج ويُطلى به بنفس الوقت.

ونتيجة للتوضع غير المنتظم تماماً لذرات السيليسيوم، فإنه يتمتع بدرجة امتصاص أعلى للإشعاع الشمسي من السيليسيوم البلوري، وبذا فإن سماكة 1 m لسطوح العبور (الممرات) p/n كافية. كذلك يمكن ربط هذه الخلايا الشمسية الرقيقة على التسلسل بالتبخير على شكل جملة.

إن إنتاج الخلايا الشمسية اللابلورية أرخص بكثير من إنتاج الخلايا الشمسية البلورية ولكن مردودها صغير، إذ يتراوح بين 5 و 8 %. يمكن أن تُنتج مثل هذه الخلايا الشمسية بمحوم مختلفة حسب الحاجة كما أن العمل والجهد المبذولين لإنتاجها وكذلك استهلاك السيليسيوم الصافي تحقق وفضلاً مقارنة بالخلايا الشمسية البلورية.

كذلك يمكن إنتاج الخلايا الشمسية ذات الطبقة الرقيقة من أنصاف نواقل أخرى مثل GaAs، أو CdTe أو CuInSe_2 ... الخ. عند الإنتاج بكميات كبيرة يتم الحصول بالخلايا الشمسية المصنوعة من GaAs على مردود يبلغ حوالي 20 %. يتم الوصول إلى أكبر مردود بواسطة ما يسمى بالخلايا الشمسية الترادفية (Tandem)، إذ يصل إلى ما يزيد على 30 %، وتتألف هذه الخلايا من عدة طبقات، مواد أنصاف النواقل فيها مختلفة. يكون التأثير الكهروضوئي (الفوتوفولطي) أعظمياً لمادة ما في جزء من الطيف الشمسي ولمادة أخرى في جزء آخر من الطيف. فمثلاً يكون أعظمياً لـ

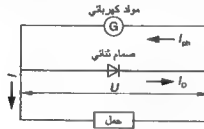
كبريت الكاديوم والسيلينيوم (Se) في مجال الضوء المرئي، أما للسليسيوم أو GaAs في مجال قريب من الأشعة تحت الحمراء (Infra-red). وقد أمكن في المخبر وبلاستعانة بـ GaAs/GaSb الحصول على مردود قدره 37% (يمكن نظرياً تحقيق قيم تصل حتى 40%).

2.3.10 المنحني المميز والمردود لجملة شمسية كهروضوئية (PV)

المنحني المميز للتيار وللتوتر (الجهد) الكهربائي

يبين الشكل (14.10) مخططاً مكافئاً لوصل مجموعة شمسية (كذلك يمكن استخدام هذا المخطط للخلايا الشمسية والمولدات الشمسية). يستعاض بذلك عن الخلية الشمسية بمولد كهربائي وصمام ثنائي (diode) موصول به على التوازي. يتفرع تيار الضوء I_{ph} الذي يولده المولد الكهربائي إلى تيار في الدارة الخارجية I وإلى تيار في الصمام الثنائي I_D .

تتميز الدارة المكافئة بتيار الإشعاع أو الإغلاق للصمام الثنائي I_0 ومقاومة الدارة التفرعية R_D أو R_{sh} للصمام الثنائي. إن مقاومة الدارة التفرعية R_{sh} للخلايا الشمسية الحديثة عالية.



الشكل 14.10 : المخطط المكافئ لوصل جملة شمسية.

يبين الشكل (15.10) المنحني المميز للتيار (الجهد) — التيار في خلية شمسية، وهو يمثل تخطيطاً العلاقة بين التيار I الذي تقدمه الجملة الشمسية والتوتر (الجهد) للمولد. عند درجة حرارة ثابتة وشدة ثابتة للإشعاع الشمسي تطبق العلاقة التالية:

$$I = I_{sc} - I_0 [\exp (qU / k T) - 1] \quad [A] \quad (34.10)$$

حيث: I شدة التيار [A]

I_{sc} تيار القصر [A] (Short Circuit)

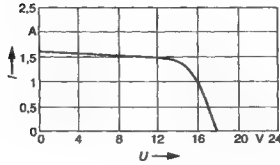
I_0 تيار الإشباع (الإغلاق) للصمام الثنائي [A]

q الشحنة الأولية (العنصرية) ($1.60219 \times 10^{-19} \text{C}$)

U التوتر (الجهد) الكهربائي [V]

k ثابت بولتزمان ($1.38066 \times 10^{-23} \text{J/K}$)

T درجة الحرارة [K].



الشكل 15.10 : المنحني المميز للجهد - التيار في عملية شمسية.

ينتج من المنحني المميز للتوتر - التيار كل من تيار القصر I_{sc} والتوتر بدون حمل U_{oc} والاستطاعة الأعظمية P_{max} للحملة الشمسية. يوافق تيار القصر التوتر المقدم، أما التوتر بدون حمل U_{oc} فهو يمثل أعظم توتر عندما لا يسري أي تيار ($I = 0$). ينتج من المعادلة 34.10 عندما يكون $I = 0$ ما يلي:

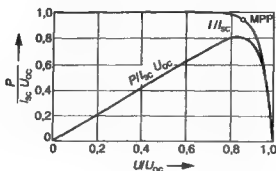
$$I_{sc} / I_o = \exp(q U_{oc} / k T) \sim 1 \quad (35.10)$$

أما استطاعة الحمل الشمسية فتنتج من العلاقة التالية:

$$P = I U = \{I_{sc} - I_o [\exp(q U / k T) - 1]\} U \quad [\text{W}] \quad (36.10)$$

يبين الشكل (16.10) المنحني المميز بشكل لا بعدي كعلاقة بين I / I_{sc} و U / U_{oc} ، بالإضافة إلى منحني الاستطاعة ($P / I_{sc} U_{oc}$) للحملة الشمسية. توافق الاستطاعة الأعظمية النقطة MPP (Maximum Power Point) ذات التيار I_p والتوتر U_p . وتنطبق العلاقة $P_{max} = I_p U_p$ ، وتُعرف الاستطاعة الاسمية بحملة شمسية بأنها الاستطاعة عند النقطة MPP عندما يكون الإشعاع 1000 W/m^2 ودرجة الحرارة 25°C . يتعلق المنحني المميز لحملة بشدة الإشعاع الشمسي، وعند شدات إشعاع منخفضة يتناقص تيار القصر وتنزاح النقطة MPP باتجاه التناقص القليل للتوتر.

عندما ترتفع درجة حرارة الخلية الشمسية جراء الإشعاع الشمسي الممتص (خصوصاً عند ارتفاع درجة حرارة الوسط المحيط) تنزاح النقطة MPP باتجاه التوتر الأخفض.



الشكل 16.10 : المنحني المميز لخلية شمسية مثالية.

فمثلاً عند ارتفاع درجة الحرارة من 25 °C إلى 40 °C يحصل ضياع في الطاقة، تصل قيمته في الخلايا الشمسية البلورية المصنوعة من السيليسيوم إلى 3 وحتى 5 % كل عام. تبلغ قيمة الضياع في كسب الطاقة بفعل اختلاف الإشعاع الوسطي (في وسط أوروبا 500 W/m²) عن القيمة الاسمية (1000 W/m²) 7%.

لحساب درجة حرارة الجملة الشمسية المعرضة للأشعة، يجب إجراء موازنة حرارية لهذه الجملة الشمسية:

$$(37.10) \quad I_{sol} \tau \alpha = \eta_M I_{sol} + k_M (t_M - t_{amb})$$

حيث: I_{sol} شدة الإشعاع في مستوى الجملة الشمسية [W/m²]

τ و α درجة التحويل (النقل) للغطاء الشفاف، و α درجة امتصاص الجملة الشمسية للإشعاع الساقط عليها.

η_M مردود (كفاءة) الجملة الشمسية

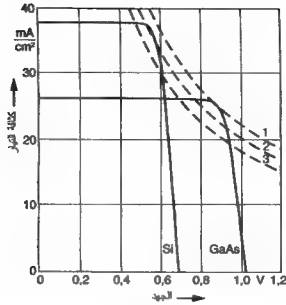
k_M عامل الضياع الحراري الإجمالي للجملة الشمسية [W/m²K]

t_M درجة حرارة الجملة الشمسية [°C]

T_{amb} درجة حرارة الوسط الخارجي المحيط [°C]

وينتج من ذلك درجة حرارة الجملة الشمسية:

$$(38.10) \quad t_M = t_{amb} + I_{sol} (\tau \alpha - \eta_M) / K_M$$



الشكل 17.10 : المنحنيات المميزة والمراديد (0.22 - 1، 0.2 - 2، 0.18 - 3) لأفضل خلايا شمسية مصنوعة من السيليسيوم أو GaAs.

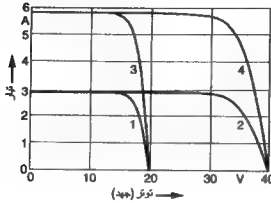
يبين الشكل (17.10) منحنيات المردود لأفضل خلايا شمسية من النوع GaAs أو السيليسيوم بالإضافة إلى المنحنيات المميزة لها. أما القيم المميزة لهاتين الخليتين الشمسيين فهي مبينة في الجدول (7.10).

عند الوصل على التوازي للحمل الشمسية تجمع التيارات، وعند الوصل التسلسلي لها تجمع التوترات الكهربائية.

الجدول 7.10: القيم المميزة لخلية السيليسيوم الشمسية (من النوع LBSF من مادة السيليسيوم النموذج 0.5 Wcm) والخلية الشمسية GaAs (النموذج p/n GaAlAs، المادة Ga As)

القيمة المميزة	الوصف (الرمز)	الواحدة	خلية السيليسيوم الشمسية	خلية GaAs الشمسية
التوتر بدون حمل	U_{oc}	mV	682	1016
كثافة تيار القصر	I_{sc}/A	mA/cm ²	37.9	26.1
درجة الملء	FF	-	0.796	0.839
المردود (الكفاءة)	η	-	20.6	22.3
المساحة	A	Cm ²	2 × 2	1 × 1

يُبين الشكل (18.10) المنحني للميز للتيار — التوتر من أجل الوصل التسلسلي أو التفرعي للحمل الشمسية.



1. الجملة 55-W
2. جملتان موصولتان على التسلسل
3. جملتان موصولتان على التوازي (التفرع)
4. جمع بين 2 و 3

الشكل 18.10 : المنحنيات المميزة للجملة الشمسية.

أما الجدول (8.10) فيبين المواصفات الفنية للجملة الشمسية M 55 من مصنع شركة Siemens.

الجدول 8.10: المواصفات للجملة الشمسية M55 من شركة سيمنس
Siemens.

القيمة	القيمة المميزة
53	الاستطاعة الأعظمية W, P_{max}
21.7	التوتر بدون حمل V, U_{oc}
3.35	تيار القصر A, I_{sc}
$36 \times 329 \times 1293$	الأبعاد mm
5.7	الوزن، kg

المردود

يُعرف مردود (كفاءة) جملة شمسية η_M بأنه نسبة الاستطاعة الكهربائية الأعظمية المنتجة P_M إلى استطاعة الإشعاع المستقبل.

(39.10)

$$\eta_M = P_M / A_M I_{sol}$$

حيث: A_M المساحة الصافية لسطح الجملة الشمسية
 I_{sol} شدة الإشعاع الشمسي في مستوى الجملة الشمسية.

وتصبح الاستطاعة الكهربائية الأعظمية الممكنة تقديرها:

$$P_M = I_{sc} U_{oc} FF \quad (40.10)$$

حيث: I_{sc} تيار القصر

U_{oc} التوتر بدون حمل

FF درجة الملء.

أما حساب التوتر (الجهد) بدون حمل U_{oc} وتيار القصر I_{sc} (عند $R_s = 0$ و $R_{sh} = \infty$) فيحسبان كما يلي:

$$U_{oc} = (A_M k T / q) \ln (I_{sc} / I_0 + 1) \quad (41.10)$$

$$I_{sc} = I_{ph} \quad (42.10)$$

حيث: I_0 تيار الإشباع في الصمام الثنائي و I_{ph} التيار الضوئي المولد في الجملة الشمسية [A].

عامل الملء هو نسبة الاستطاعة الأعظمية إلى مساحة المستطيل ذي البعدين I_{sc} و U_{oc} :

$$FF = P_M / I_{sc} U_{oc} \quad (43.10)$$

لكن يتم الحصول على استطاعة ومردود أعظميين يجب أن تكون قيمة I_{ph} أعظمية وقيمة I_0 أصغرية.

تحتسب الاستطاعة المفيدة لجملة شمسية من الفرق بين تيار الإشعاع الشمسي الممتص وتيار الضياعات الحرارية. تتعلق ضياعات الطاقة في الجملة الشمسية بآلية التحول الكهروضوئية (PV) وهي تحصل للأسباب التالية (القيم الموجودة بين قوسين هي القيم النظرية منسوبة إلى الإشعاع الشمسي الساقط):

- لا تمتص الفوتونات الموجودة في مستوى الطاقة E الواقع تحت مستوى فجوة الطاقة E_g (تبلغ هذه الضياعات في الطاقة لخلية السيليسيوم الشمسية 24 % وفي خلية GaAs تبلغ 38 %).
- تُحوّل طاقة الفوتونات الفائضة إلى طاقة حرارية في الشبكة المعدنية — الغلاف (تبلغ هذه الضياعات في الطاقة لخلية السيليسيوم 32 % و لخلية GaAs تبلغ حوالي 19 %).
- عامل الكسب (الربح) qU_{oc}/E_g (خلية السيليسيوم الشمسية و لخلية GaAs يبلغ حوالي 12 %).
- تبلغ الضياعات الأخرى (عامل FF ، مردود التجميع، مقاومة الربط على التسلسل و ضياعات الانعكاس) مجملها حوالي 11 % في خلية السيليسيوم الشمسية و 19 % في خلية GaAs. ولهذا فإن مردود خلية السيليسيوم الشمسية يبلغ 10 إلى 12 %.

3.3.10 بنية وعناصر الوحدات الكهربائية الضوئية (PV - Systems)

الوحدات الكهربائية الضوئية المفردة والموصولة مع الشبكة

يقدم المولد الشمسي تياراً فقط عندما يتعرض للضوء، وتعلق قيمة التيار المستمر المولّد بشدة الإشعاع. لا يمكن قبول عدم استمرار تقديم الطاقة إلا في مجالات الاستخدام البسيط (مثل مضخات الماء، الآلات الحاسبة أو الساعات) وفي مثل هذه الحالات يوصل الجهاز المراد تغذيته بالتيار مباشرة مع المولد الشمسي. يزداد أمان التغذية لمستهلك تيار مستمر بوصول المنشأة مع العناصر التالية:

— مدّخرات (بطاريات) لتخزين التيار الكهربائي

— مولدات إضافية

ولتغذية المستهلكين الذين يحتاجون إلى تيار متناوب يتم تحويل التيار المستمر إلى تيار متناوب. يتم ضمان تأمين التيار عن طريق الوصل التفرعي (على التوازي) بالشبكة الكهربائية العامة.

ثمة نوعان من الوحدات الكهربائية الضوئية:

— معدات تأمين التيار الكهربائي المستقلة عن الشبكة والتي تعمل بشكل منفرد وليس لها أي اتصال بالشبكة العامة وتشكل بحد ذاتها شبكة خاصة.

— وحدة مربوطة بالشبكة العامة.

إن الوحدات المستقلة مناسبة لتزويد المستهلكين البعيدين عن الشبكة العامة كمضخات الماء وأجهزة الاتصالات (إرسال الإشارات) ومحطات القياس. وأكواخ متسلسلي الجبال*... إلخ. يبين الشكل (19.10) غطط وصل جملة مستقلة، وهي تتألف من العناصر التالية:

— مولد شمسي (كهروضوئي)

— بطارية تخزين مع منظم شحن

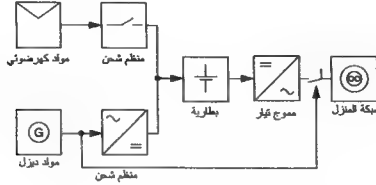
— موزّع تيار (يحول التيار المستمر إلى متناوب)

— المجموعة الاحتياطية المولدة من محرك احتراق داخلي ومولدة

— شبكة التوزيع الرئيسية.

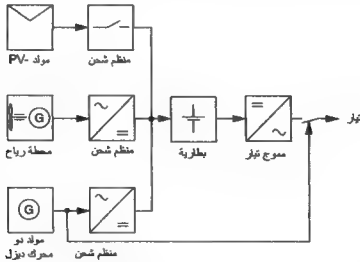
* كما هو الحال في جبال الألب في أوروبا (الترجم).

عما أن المولدات الشمسية يمكن أن تأخذ حجوماً مختلفة، فإن استطاعات الوحدات المستقلة تختلف حسب الحاجة.



الشكل 19.10 : مخطط وصل منشأة ضوئية كهربائية مستقلة (جمللة الجزيرة).

إن الوحدات الضوئية الكهربائية التي توصل بشبكة الكهرباء العامة أبسط بكثير من الوحدات المستقلة. يُحوّل التيار المستمر للمولد الشمسي عن طريق مَوْج التيار إلى تيار متناوب وثلاثي الطور حسب الحاجة يغذي المستهلك مباشرة أو يغذي الشبكة العامة. ولما كانت الشبكة العامة تعتبر خزاناً كبيراً للطاقة، فهي قادرة على تلقي الطاقة المولدة الفائضة أو تغطية النقص.



الشكل 20.10 : مخطط وصل منشأة هجينة (عدة مصادر توليد) لتأمين التيار الكهربائي مولفة من وحدة ضوئية كهربائية (PV)، ومولد تيار للطوارئ (محرك ديزل ومولد)، ومحطة رياح.

يمكن ربط وحدات PV- مع منشآت توليد طاقة أخرى مثل محطات التدفئة وتوليد الكهرباء ومجموعات الطوارئ لتوليد الكهرباء ومحطات الرياح. بين الشكل (20.10) مخطط وصل محطة هجينة (hybrid). يتم توليد الطاقة الكهربائية في مولد شمسي أو في محطة رياح أو بواسطة محرك ديزل مع مولدة. تصبح المنشأة كاملة بإضافة بطارية تخزين وموَج للتيار وشبكة للتوزيع. كما بين الجدول (9.10) المواصفات الفنية لهذه المنشأة.

الجدول 9.10: المواصفات الفنية للمنشأة الهجينة لتأمين الكهرباء لمحطة معالجة مياه المجاري (في ألمانيا).

الوصف	القيمة
1. مولد PV من النوع PQ10/40	40 قطعة
39 متعدد البلورات	
الاستطاعة الأعظمية	140 kW
2. موج تيار	اثنا كل منهما 80 kVA
3. محطة الرياح	
الاستطاعة الاسمية	250kW
الدوار (rotor)	ثلاث شفرات بقطر 25m، مادة الأجنحة GFK
ارتفاع البرج	27.3 m
4. محطة التدفئة وتوليد الكهرباء	محرك M102- Daimler-Benz
الاستطاعة الاسمية	30 kW (كهربائية) و 60 kW (حرارية)
الوقود	غاز حيوي (biogas)

الجميل الشمسية

يجري في الجمل الشمسية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية، وهي تتألف من عدة خلايا شمسية متصلة بجمعة ضمن مادة بلاستيكية مرنة. لحماية الجملة الشمسية من التأثيرات الخارجية يوضع على وجهها الأمامي غطاء زجاجي شديد الشفافية وعلى الجانب الخلفي توضع علية وصل كتيمة ضد الماء. أما الإطار فهو مصنوع من الألومنيوم المقاوم للصدأ.

المواصفات الكهربائية لجملة شمسية هي الاستطاعة العظمى P_{max} ، تيار القصير I_{sc} ، توتر (جهد) العمل بدون حمل U_{oc} بالإضافة إلى التيار I والتوتر (الجهد) في حالة التحميل.

على سبيل المثال فإن المواصفات الفنية للجملة الشمسية M 55 ذات خلايا السيليسيوم الشمسية التي عددها 36، إنتاج شركة سيمينس كما يلي:

$$U = 17.4 \text{ V} , I = 3.05 \text{ A} , U_{oc} = 21.7 \text{ V} , I_{sc} = 3.4 \text{ A} , P_{max} = 53 \text{ W}$$

أما الأبعاد والوزن فهي:

$$5.7 \text{ kg} \text{ و } 1293 \times 330 \times 36 \text{ mm}$$

تتكون الجملة الشمسية المولدة من خلايا ذات الطبقة الرقيقة من حامل زجاجي، وخلايا شمسية غير منتظمة (لابلورية) تتوضع على طبقة أكسيد الزنك الجيدة الناقلية بالإضافة إلى غطاء زجاجي، وعلى الجانب الخلفي ثمة طبقة ناقلة وغماسات كهربائية مع مرس كهربائي (كابل). تحاط هذه الجملة بإطار بلاستيكي (PUR) يغلفها.

للجملة الشمسية ذات الطبقة الرقيقة T 25 الأبعاد التالية $1321 \times 365 \times 23 \text{ mm}$ ، ومواصفاتها الفنية كما يلي:

$$U = 15 \text{ V} , I = 1.7 \text{ A} , U_{oc} = 23 \text{ V} , I_{sc} = 2.1 \text{ A} , P_{max} = 25 \text{ W}$$

المدخرات (البطاريات)

تتعلق استطاعة الطاقة الكهربائية المولدة بالمولد الشمسي مباشرةً بشدة الإشعاع الشمسي، ولكن استهلاك الطاقة يختلف عادةً عن مقدار الطاقة المتاحة. لموازنة هذه الفروق تستخدم بطارية تخزين. تتلقى البطارية فائض الطاقة الكهربائية في أوقات ارتفاع شدة الإشعاع الشمسي وتخزنها ثم تعيدها ثانية إلى المستهلك في أوقات انخفاض شدة الإشعاع الشمسي.

تستخدم في منشآت PV- التي تزيد استطاعتها على 10 W مدخرات رصاصية، تتألف من سلسلة من صفائح الرصاص في خزان يحوي حمض الكبريت الممدد. عندما تكون المدخرة مشحونة يكون القطب السالب من الرصاص والقطب الموجب من أكسيد الرصاص. تستخدم للأجهزة الصغيرة بطاريات قابلة للشحن ثانية مصنوعة من النيكل والكاديوم (Ni-Ca).

وتبعاً لاستطاعة المستهلك المطلوبة تقع سعة مدخرات التخزين السائدة الاستعمال بين 40 و 280 Ah. تتألف دورة المدخرة من عملية شحن وعملية تفريغ. تُنسب السعة الاسمية لمدخرة C إلى فترة تفريغ محددة t_c ذات تيار تفريغ محدد I_c .

من أجل الطاقة التي تستطيع المدخرة تخزينها بتوتر U تنطبق العلاقة:

$$E_{wh} = C U = I_c t_c U \quad [\text{Wh}] \quad (44.10)$$

على سبيل المثال تخزن بطارية سعتها Ah 200 توتراً قدره V 12 وقدرة $2400 \text{ Wh} = 12 \times 200$. ولضمان العمر الأطول (5 أعوام) للمدخنة يجب تجنب حالات زيادة الشحن أو تناقصه الشديد (تفريغ المدخنة).

يبلغ التوتر الاسمي للمدخنة رصاصية V 2 لكل خلية. ويمكن الحصول على السعة المطلوبة والتوتر للمدخنة عن طريق الوصل التسلسلي أو التفرعي. تتألف المدخنة V 12 من 6 خلايا موصولة على التسلسل ومتوضعة في علبة. والبطاريات الكبيرة ذات V 6 تحوي ثلاث خلايا فقط. من أجل سعة أكبر من Ah 200 تستخدم خلية واحدة.

يقوم منظم الشحن للمدخنة بعملية وقايتها من زيادة الشحنة لتجنب توتر تصاعد الغازات (gasing) ولتحاشي التفريغ الشديد إلى ما دون حدود معينة (مثلاً 10.5 V) والوقاية من التيار العكسي وذلك لتفادي سريان تيار من البطارية إلى الجملعة الشمسية عند حلول الظلام.

يُستخدم محول التوتر لتشغيل أجهزة ذات توترات أخرى. تستخدم في الأجهزة ذات التيار المستمر محولات التوتر المستمر (محول DC/DC) بمردود 80 %. أما أجهزة التيار المتناوب فيمكن وصلها عبر موجّج تيار بمردود 70 إلى 85 % في مدخنة ذات V 12 أو V 24.

لضمان توفير التغذية الكهربائية بشكل أفضل يستخدم إلى جانب منشأة PV مجموعة توليد مؤلفة من محرك احتراق داخلي ومولدة تقوم بتوفير التيار اللازم وبشحن المدخنة.

4.3.10 تصميم المنشأة الكهرضوئية (PV)

موازنة الطاقة

لموازنة الطاقة في منشأة PV مستقلة، تتألف من مولد شمسي، ومنظم (موجّج Inverter)، ومدخنة ومولد مع محرك ديزل وحمولة وذلك عبر فترة استخدام معينة تنطبق العلاقة:

$$E_G + E_{db} + E_D - E_v = E_L \quad [J] \quad (45.10)$$

حيث: E_G الطاقة الكهربائية المولدة من المولد الشمسي

E_{db} الطاقة المحولة في المدخنة

E_D الطاقة الكهربائية المستحقة من مولد محرك الديزل

E_{loss} الاستهلاك الذاتي للطاقة وضياعات الطاقة للمنظم والمدخنة.

E_L الطاقة الكهربائية المستهلكة (الحمولة).

تستخدم المعادلة (45.10) لحساب الاستطاعة المقابلة P . تحسب كميات الطاقة بالمكاملة للاستطاعات الموافقة خلال الأوقات المقابلة t .

وبالتالي فالطاقة المقدمة من قبل المولد الشمسي خلال الفترة t هي:

$$E_G = A_G I_{sol} \eta_G t \quad [J] \quad (46.10)$$

حيث: A_G مساحة سطح الخلايا الشمسية الإجمالية $[m^2]$

I_{sol} شدة الإشعاع الشمسي الآتية أو الوسطية $[W/m^2]$

η_G المردود الآتي أو الوسطي للمولد الشمسي

T الفترة الزمنية $[s]$.

يراعي المردود η_G للمولد الشمسي بالإضافة إلى ضياعات التحويل في منشأة PV، ضياعات طاقة الإشعاع الشمسي إلى الوسط المحيط.

تُحسب سعة تخزين الطاقة للمدخنة مقدرة بالواط الساعي عن طريق العجز (النقص) في الطاقة الكهربائية الذي يمكن أن ينشأ خلال فترة تصميمية محددة.

ويُحسب حجم المولد الشمسي بدون ادخار طاقة عن طريق معرفة استهلاك الطاقة خلال فترة تفريغ محددة.

مساحة سطح الخلايا الشمسية

يستخدم لتحديد فترة التصميم t (عمر الخلية الشمسية) مدة الاستقلال الذاتي t_s (الفترة الزمنية التي تتكرر بعدها عملية توليد الطاقة للمولد الشمسي واستهلاكها). تُحسب المساحة اللازمة للخلايا الشمسية من أجل قيمة معينة لـ t_s ولاستهلاك معين للطاقة (E_L) كما يلي:

$$A_G = E_L / \eta_G I_{sol} t_s \quad [m^2] \quad (47.10)$$

كسب الطاقة السنوي

لحساب الإنتاج السنوي للطاقة في منشأة PV ندخل مفهوم عامل الجودة Q :

$$Q = P_a / P_n \quad (48.10)$$

حيث: P_a الاستطاعة الفعلية الوسطية لمنشأة PV و P_n الاستطاعة الاسمية.

وبين الجدول (10.10) قيم Q .

لحساب الكسب السنوي للطاقة تستخدم العلاقة التالية:

$$E_g = E Q P_{\max} / I_{\text{sol}} \quad [\text{kWh/a}] \quad (49.10)$$

حيث: E : المجموع السنوي للإشعاع الإجمالي على 1 m^2 من سطح المولد الشمسي $[\text{kWh/m}^2\text{a}]$
 Q : عامل الجودة

P_{\max} : الاستطاعة الأعظمية للمولد الشمسي الكهربائي $[\text{kW}]$

I_{sol} : شدة الإشعاع الشمسي عند الشروط الاسمية أي 1 kW/m^2 .

الجدول 10.10: عوامل الجودة للأنواع المختلفة من المنشآت الضوئية الكهربائية وعناصرها.

العناصر / الجملة	Q
الجملة الشمسية، المولد الشمسي، منشآت PV- المستقلة	0.88-0.8
— بدون مولد إضافي	0.4-0.1
— مع مولد إضافي	0.6-0.4
المنشأة التي توصل بالشبكة	0.73-0.6

تصل قيم الكسب في الطاقة إلى ذروتها في المنشآت الضوئية (منشآت PV-) الموصولة بالشبكة. كذلك يجب مراعاة الضياعات الحرارية التالية: ضياعات الموامعة أثناء تغليف الجملة الشمسية والضياعات الأومية الحرارية في التمديدات (الكوابل) والضياعات في المنظمات (كل منها تبلغ 2%)، والضياعات في موججات التيار (10 إلى 15 %).

يتراوح الإنتاج السنوي للطاقة في منشأة PV ذات خلايا سيليسيوم شمسية، منسوبة إلى 1 kW للاستطاعة الأعظمية، بين حوالي 1000 kWh/a لكل kW في الشمال (في مدينة هامبورغ الألمانية) و 1120 kWh/a لكل kW في الجنوب (Weihenstephan).

5.3.10 الاستخدام والاعتبارات الاقتصادية

حجم الإنتاج باستخدام منشآت PV

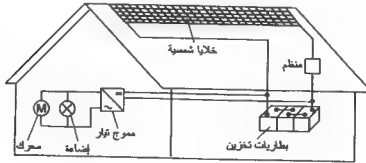
بلغ حجم الإنتاج العالمي المتاح عام 1990 باستخدام منشآت PV مقدار 67.6 MW ، منها 48 MW في البلدان الصناعية و 19.6 MW في البلدان النامية. أما الإنتاج العالمي لمنشآت PV فقد بلغ 49 MW ، والاستطاعة الكلية المركبة 46.5 MW ، منها 17.7 MW في البلدان الصناعية و 28.8 MW في البلدان النامية. ويبلغ عام 1991 في العالم من المولدات الشمسية ما استطاعته 20 MW ،

منها 40 % من الصناعة الأمريكية (USA) واليابانية 33 %، والأوروبية 19 %، ومن الصناعة الألمانية 7 %.

تختلف مجالات استخدام PV بحسب الاستطاعة، والوصل بالشبكة والغرض من الاستخدام. تغطي جمل PV المستقلة والموصولة بالشبكة العديد من الاستخدامات بدءاً من الأجهزة الصغيرة (الخلايا الشمسية اللابُورِيَّة في الآلات الحاسبة والساعات) حتى مجال الاستطاعات الصغيرة وصلاً إلى مجالات الاستطاعة المتوسطة التي تبلغ 50 W حتى 5 kW ومن 100 kW حتى بضعة ميغاواط. تستخدم منشآت PV المستقلة التي تتراوح استطاعتها بين 50 و 5 kW للمشاريع المستقلة (البيوت، محطات، الإرسال والإذاعة، الإنارة، مضخات الماء... إلخ).

تحتاج منشآت PV المركبة على السقف لأجل التغذية اللامركزية (المحلية) للمنازل السكنية استطاعة تبلغ 1 حتى 5 kW. يمكن استخدام منشآت PV في البلدان ذات السطوع الشمسي الطويل (جنوب أوروبا مثلاً)، وفي مجال الزراعة لتأمين مياه الشرب وللري والتبريد وتزويد القرى بالكهرباء... إلخ.

تم في الولايات المتحدة ومنذ عام 1983 إنشاء وتوسيع عدة منشآت PV (قسم منها بالاعتماد على الجمل الشمسية ذات المرايا الدوارة)، ويمكن اعتبارها وفقاً لاستطاعتها — مُخطَّط حتى 100 MW — محطات توليد كهرباء بالطاقة الشمسية. أنشئت في عام 1984 منشأة PV في Carrisa Plains (كاليفورنيا — USA) تحوي 754 مرآة دوارة عاكسة يتألف كل منها من 100 m² من الخلايا الشمسية وباستطاعة أعظمية قدرها 6.5 MW. ومن المزمع توسيعها لتصبح استطاعتها 16 MW باستخدام الخلايا الشمسية الترادفية (tandem).



الشكل 21.10 : تغذية منزل بالتيار الكهربائي باستخدام للنشأة PV.

ترود هذه المحطة الموصولة بالشبكة العامة 2300 منزلاً بالتيار الكهربائي. أما في البلدان الصناعية القوية بالشمس فتستخدم المولدات الشمسية للبيوت البعيدة المنزلة (للإنارة والبراد والعدة والراديو) وكذلك للقوارب، والمنازل وأجهزة الإرسال العالمية وإشارات المرور وأنفاق المرور. أما في البلدان النامية فتستخدم المولدات الشمسية بالدرجة الأولى لمضخات المياه وللمشاوي (الإنارة — التلفون)، وللقري وللزراع (تشغيل أجهزة التبريد) ولتحلية المياه ولإشارات المرور، وبين الشكل (21.10) تغذية بيت مستقل بالتيار الكهربائي. تبلغ استطاعة مولد شمسي في ألمانيا 300 kW وهو موجود في جزيرة تقع شمال ألمانيا (Pellworm).

تغذية مضخات الماء بواسطة الخلايا الشمسية

إن مجال استخدام الخلايا الكهروضوئية لتشغيل مضخات الماء يغطي المجال الواقع بين المضخات اليدوية والمضخات ذات محرك الديزل. عادة تكون الاستطاعة القصوى للمولد الشمسي في هذه الأحوال بين بضعة عشرات الواط و 10 kW. يكون التدفق للماء ضمن المجال من 1 حتى 40 m³/h وارتفاع الضخ بين 2.5 و 120 m. تعمل عادة هذه المنشآت بتوتر PV بدون مدخرات، وفقاً للمضخة المغذاة يكون توتر التيار المستمر بين 12 و 560 V والتيار المتناوب بين 60 و 380 V، ويمكن استخدام الأنواع المختلفة من المضخات (غاطسة، عائمة، ذات محور أسي، ذات امتصاص ذاتي). كذلك يمكن، أسوةً بالمجمعات الشمسية، تركيب المولدات الشمسية بطرق مختلفة (على السقف، على حوامل، المرايا الدوارة العاكسة... إلخ). ينبغي تجنب ارتفاع درجة الحرارة دوماً تحاشياً لضيعات الاستطاعة غير المبررة. يمكن ربط منشأة PV لتأمين التيار الكهربائي بشكل مشترك مع منشأة شمسية لتأمين الماء الساخن في جملة لا مركزية (محلية).

اقتصادية حمل PV

بسبب شدة الإشعاع المنخفضة وانخفاض مردود الخلايا الشمسية فإن السطح اللازم كبير. لموازنة توزع الأشعة الساقطة فإن من الضروري تخزين الطاقة في معظم الاستخدامات. إن ارتفاع تكاليف التركيب لمنشآت PV تجعل التكاليف الاستثمارية لهذه المنشآت تبلغ 15 إلى 27 DM لكل واط من الاستطاعة الأعظمية. أما تكاليف إنتاج الكهرباء فتقع حالياً بين 1.2 DM/kWh لمنشآت PV الموصولة بالشبكة والتي استطاعتها 20 kW وإلى حوالي 4.5 DM/kWh للمنشآت ذات المدخرات التي استطاعتها 0.5 kW.

زمن اهتلاك الطاقة (energy amortisation) لمنشأة PV هو الزمن اللازم لإنتاج الكمية من الطاقة التي تغطي الطاقة التي صرفت عند صنع المنشأة وتركيبها، وهي تتراوح بين أربع وسبع سنوات لخلايا السيليسيوم البلورية وبين 3 و 5 سنوات للخلايا الشمسية اللابلورية. عامل (الإنتاج) لمنشأة PV هي النسبة بين كمية الطاقة الإجمالية المولدة طول عمرها إلى الطاقة المستهلكة في صنعها وتركيبها.

إن الحاجة إلى المنشآت ذات الخلايا الشمسية لتوليد الكهرباء كبيرة على مستوى العالم، وهي قابلة للاستخدام في تأمين الطاقة المحلية للمشاريع البعيدة المعزولة وفي المناطق المناخية المختلفة. ولكن بسبب التكاليف العالية فإن التوليد المركزي للكهرباء في محطات توليد الكهرباء الشمسية سيظل ولفترة طويلة قادمة غير اقتصادي.

محطات توليد الكهرباء على الأقمار الصناعية والليزر الشمسي (SOLASER)

التصورات المستقبلية هي استخدام محطات توليد الكهرباء على الأقمار الصناعية والليزر الشمسي. سيتم في محطات الكهرباء الفضائية توليد الكهرباء بطريقة PV على أقمار صناعية في الفضاء وعلى مدار الأرض بواسطة مولدات شمسية ذات مساحات كبيرة. سيتم تحويل الطاقة المولدة إلى طاقة موجات قصيرة جداً (micro wave) وستُرسل إلى الأرض حيث ستستقبلها هوائيات مساحتها بضعة كيلو مترات مربعة. أما في مشروع الليزر الشمسي (SOLASER) فسيتم وضع ليزر غازي هائل في مدار الأرض. تُحوّل الأشعة الشمسية المركزة بواسطة المرآة عن طريق الليزر إلى طاقة ذات موجة وحيدة الطول. وسترسل استطاعة قدرها 100 MW في حزمة إشعاعات قطرها 20 إلى 100 m إلى الأرض.

مثال 4.10

كم يجب أن تكون مساحة سطح المولد الشمسي لمحطة كهرباء قمر صناعي استطاعتها $P_{el} = 100 \text{ MW}$ ؟

مردود التحويل المباشر للطاقة الشمسية إلى تيار كهربائي هو $\eta = 11\%$.

الحل

تسقط على مولدات الأقمار الصناعية إشعاعات خارج الأرض (extraterrestrial) التي تبلغ شدتها الوسطية قيمة مساوية للثابت الشمسي $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$

فالمساحة اللازمة للمولد الشمسي تنتج كما يلي:

$$\begin{aligned} A = P_{el} / \eta_{lbc} &= 10^8 \text{ W} / (0.11 \times 1367 \text{ W/m}^2) \\ &= 665026 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

11 الطاقة المائية، طاقة الرياح، طاقة باطن الأرض الحرارية، الكتلة الحيوية

1.11 محطات التوليد الكهرمائية*

مساهمة المحطات المائية في توليد الكهرباء

يصل الاحتياطي العالمي لطاقة المياه الجارية على الأرض ما يعادل توليد طاقة كهربائية مقدارها 36×10^{12} kWh في العام الواحد، أما الطاقة التي يمكن الاستفادة منها فهي تعادل حوالي 11×10^{12} kWh/a. ويُؤَلَّد في الوقت الحاضر بواسطة المحطات المائية 2.04×10^{12} kWh كهرباء سنوياً (عام 1987). بلغت مساهمة المحطات المائية في توليد الكهرباء عام 1984 كما يلي: في النرويج 99.7 %، البرازيل 94 %، كندا 66 %، النمسا 69 %، سويسرا 62 %، الولايات المتحدة (USA) 13 %، الاتحاد السوفيتي السابق 14 %، ألمانيا 4.6 %.

الاستطاعة المفيدة

تُستثمر في المحطات المائية الطاقة الحركية للماء، والتي تنشأ من الطاقة الكامنة للموقع عند جريان المياه بين ارتفاعات مختلفة. تتعلق الاستطاعة المفيدة للمحطة المائية: بتدفق الماء في العنفة وبارتفاع السقوط ويصبح:

$$P_u = g V \rho H \eta_T \eta_G \eta_{Tr} = g V \rho H \eta_e \quad [W] \quad (1.11)$$

حيث: g التسارع الأرضي (9.81 m/s^2)

V التدفق الحجمي للماء في العنفة [m^3/s]

ρ الكتلة النوعية للماء [kg/m³]

H ارتفاع السقوط المجدي [m]

η_T مردود العنفة (0.85-0.95)

η_G مردود المولد (0.95-0.99)

η_{Tr} مردود المحوكة (0.92-0.98)

η_o المردود الفعّال للمحطة المائية.

وتبعاً للاستطاعة P_o ثمة محطات صغيرة (حتى 10 kW) ومتوسطة (حتى 100 MW) وكبيرة (فوق 100 MW). أكبر ثلاث محطات مائية في العالم هي: محطة Itaipu في البرازيل/الباراغوي باستطاعة 12.6 GW، محطة Grand Coulee في الولايات المتحدة الأمريكية باستطاعة 10.83 GW، محطة Guri في فنزويلا باستطاعة 10.3 GW. تقسم المحطات المائية إلى: محطات ذات ضغط منخفض، وفيها يصل ارتفاع السقوط إلى 10 m ومحطات ذات ضغط عالٍ يكون ارتفاع السقوط فيها أكبر من 100 m.

مثال 1.11

ما هي الاستطاعة المفيدة لعنفة بلتون (Pelton) عندما يكون تدفق الماء الحجمي $V = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ والمردود الفعلي $\eta_o = 0.82$ ؟
يُساق الماء من ارتفاع $H = 300 \text{ m}$ إلى العنفة. الكتلة النوعية للماء $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

الحل:

نحسب الاستطاعة المفيدة للعنفة وفق للمعادلة 1.11 كما يلي:

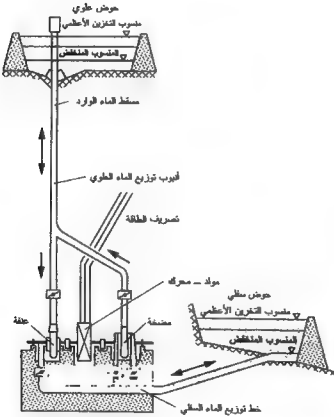
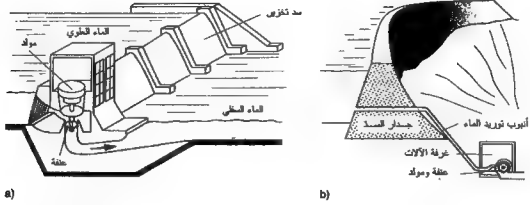
$$P_u = g V \rho H \eta_o$$

$$= 9.81 \text{ m/s}^2 \times 70 \text{ m}^3/\text{s} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \times 300 \text{ m} \times 0.82 = 168.9 \text{ MW}$$

أنواع المحطات المائية

تقسم المحطات المائية إلى: محطات المياه المناسبة (الجارية) ومحطات المياه المخزنة والمحطات ذات التخزين بالضغط (Pumped-Storage Power Plants).
والشكل (1.11) من a إلى c يبين مبدأ عمل هذه المحطات.

تُشَدُّ محطات المياه الجارية على الأنهار أو الجداول (الأنهار الصغيرة) وتتميز بكميات مياه كبيرة، ولكن ذات الانحدار القليل.



الشكل 1.11 : مبدأ عمل: (a) محطات المياه الجارية، (b) محطات المياه المخزنة، (c) المحطات ذات التخزين بالضخ.

تتماز محطات المياه المخزنة بالتدفقات القليلة للماء وبفروق الارتفاع الكبيرة جداً والتي تتحقق بواسطة بحيرات وتشكل خلف السدود، حيث تستطيع بحيرة السد تخزين الماء خلال فترات طويلة. تستخدم المحطات الكهرمائية ذات المياه المخزنة لتغطية حمولات الذروة وكذلك للحمولات الأساسية. إن تخزين الطاقة الكامنة للماء هو الطريقة الأنسب من ناحية التكاليف والأكثر رفقاً بالبيئة إذا أريد تخزين الطاقة. أما المحطات ذات التخزين بالضخ فتستخدم لتغطية حمولات الذروة واحتياطي آبي لتوليد الكهرباء (عند خروج محطة توليد كهرباء حرارية تغطي الحمولات الأساسية من الخدمة، إذ أن زمن وصلها وتشغيلها قصير لا يتجاوز الدقيقة الواحدة. محطات المياه المخزنة والمحطات ذات التخزين بالضخ هي منشآت ذات ضغط عالٍ. بين الجدول (1.11) معطيات الاستطاعة لأكثر محطات المياه المخزنة في العالم.

الجدول 1.11: معطيات الاستطاعة لأكثر محطات المياه المخزنة في العالم.

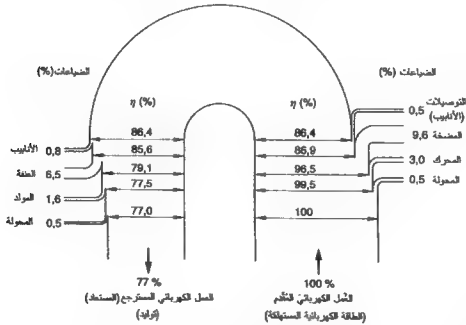
المحطة المائية	الاستطاعة [MW]
Itaipu (البرازيل، نهر Parana)	12600
Grand Coulee (الولايات المتحدة، نهر كولومبيا)	10830
Guri (فنزويلا، نهر Caroni)	10300
Sajano-Schuschenskaja GES (روسيا، نهر Jenissei)	6400
krasnojarskaja GES (روسيا، نهر Jenissei)	6000

تتألف المحطة ذات التخزين بالضخ من عدة مجموعات عنفات ومعدات ضخ وأنابيب الضغط المرتفع وحوضين للتخزين (حوض علوي وآخر سفلي). يتراوح ارتفاع السقوط في محطات التخزين بالضخ العاملة في الوقت الحاضر في العالم بين 50 و 1120 m. تستخدم الطاقة الكهربائية الفائضة والمولدة في محطات تغطية الحمولات الأساسية في أوقات انخفاض الحمولات لضخ الماء إلى الحوض العلوي، ولتغطية حمولة الذروة تستخدم الطاقة الكامنة للماء المخزن في توليد الكهرباء في مجموعة العنف. بين الشكل (e1.11) أحد أشكال طريقة بناء محطة مائية ذات التخزين بالضخ. تستخدم في هذه الطريقة لبناء المحطة (التقليدية) آلتان منفصلتان هما العنف والمضخة حيث تركبان على نفس المحور مع الآلة التزامنية (Synchronous machine) التي تعمل كمولد أو محرك. هناك نوعان آخران من المحطات المائية ذات التخزين بالضخ. بعكس النوع الأول تستخدم هنا عنفة — مضخة قلوية (عكوسة) مع الآلة التزامنية.

الجدول 2.11: معطيات الاستطاعة لمحطات مخزنة ذات تخزين بالضخ.

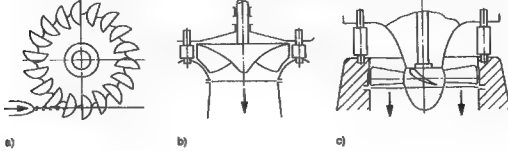
الخطوة	الاستطاعة [MW]	ارتفاع السقوط [m]	عدد المجموعات
الصفات	المضخات		
(USA) Bath Country	2100	360	6
(USA) Ludingtow	1755	110	6
Dinorwig (بريطانيا)	1620	535	6
(USA) Raccoon	1530	320	4
Shinu Takase-gawa (اليابان)	1280	265	4
Grand Maison (فرنسا)	1220	955	8
Oku-Toshino (اليابان)	1210	515	6
Zakorsk (روسيا)	1200	1120	6
Piastra (إيطاليا)	1280	1070/610	9
Wehr/Hornberg (ألمانيا)	960	660	4

يبين الجدول (2.11) المواصفات المتعلقة باستطاعة المحطات المائية ذات التخزين بالضخ الأكبر في العالم.



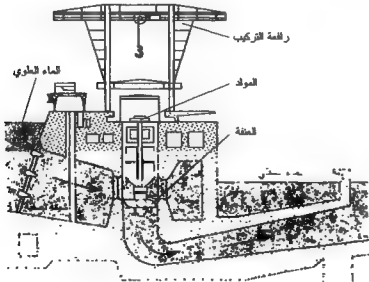
يصل مردود المحطة المائية ذات التخزين بالضخ، أي النسبة بين الطاقة الكهربائية التي تم كسبها والطاقة الكهربائية المستخدمة، إلى 75 % وأكثر.

في ألمانيا تبلغ استطاعة المحطات المائية ذات التخزين بالضخ GW 2.65. بين الشكل (2.11) عخطط تدفق الطاقة محطة الطاقة ذات التخزين بالضخ. من العمل الكهربائي المستهلك (لتشغيل المضخة يستعاد 77 % فقط (عادة بين 65 و 78 %) في مجموعة التوليد.



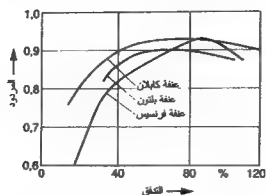
الشكل 3.11 : رسم تخطيطي لأنواع العنفات المائية (a) العنف المماسية (عنف بلتون)، (b) العنف القطرية (عنف فرنسيس)، (c) العنف المحورية (عنف كابلان).

أنواع العنفات المائية المستخدمة مبينة في الشكل (3.11) بشكل تخطيطي. تصنع العنفات المماسية (عنفات بلتون) لارتفاعات السقوط بين 300 و 2000 m وللاستطاعة حتى 300 MW. أما العنفات القطرية (عنفات فرنسيس) فتستخدم لارتفاعات السقوط من 40 حتى 700 m والاستطاعة حتى 1000 MW وبقطر للدولاب الدوار يصل إلى 11 m. أما العنفات المحورية (عنفات كابلان) فتتخذ من أجل استطاعات حتى 200 MW.



الشكل 4.11 : مقطع في محطة مياه جارية ذات عنفات كابلان.

وبين الشكل (4.11) مقطعاً في محطة مياه جارية ذات عنفة كابلان، أما الشكل (5.11) فيبين تغير مردود العنفات المائية مع الحملولة.



الشكل 5.11 : تغير المردود مع تدفق الماء (a) العنفة الماسية (بالتون)، (b) العنفة القبطرية (فرنسيس)، (c) العنفة المحورية (كابلان).

وفي المحطات المسماة بـ "الجليدية" يُستخدم الماء المتجمد المخزن لتوليد الكهرباء، وتقدر الطاقة الكامنة الممكنة الاستفادة منها في العالم بهذه الطريقة بين 0.1 و 4.10^{12} kWh/a.

2.11 محطات توليد الكهرباء باستخدام طاقة الرياح (محطات الرياح)

استطاعة الرياح في واحدة المساحة (كثافة استطاعة الرياح)

طاقة الرياح هي الطاقة الحركية لجريان الهواء، واستطاعة الرياح في واحدة المساحة p_w (كثافة الاستطاعة) هي:

$$p_w = P / A = 1/2 \rho_a w^2 = 1/2 \rho_a w^3 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.11)$$

حيث: P استطاعة الرياح

A المساحة المرجعية (عمودية على اتجاه الرياح) $[\text{m}^2]$

ρ_a كثافة التدفق الكتلي للهواء لكل m^2 من المساحة المرجعية $[\text{kg/m}^2\text{s}]$

w سرعة الرياح $[\text{m/s}]$

ρ_L الكتلة النوعية للهواء $[\text{kg/m}^3]$.

تردد سرعة الريح مع الارتفاع عن سطح الأرض، وعند سرعات ومسطبة للريح 3 أو 6 أو 9 m/s (مقاسة على ارتفاع 10 m عن سطح الأرض) تبلغ كثافة الطاقة p_a القيم 16.27 أو 130.14 أو 439.22 W/m^2 . هذه القيم تقابل كتلة نوعية للهواء $\rho_a = 1.205 \text{ kg/m}^3$ عند الدرجة 20°C والضغط 1.013 bar.

ونظراً للقيمة المتدنية لكثافة الطاقة فإن المساحات اللازمة لإنشاء محطات الرياح تكون كبيرة. تستخدم محطات الرياح فقط في المواقع ذات السرعة العالية للهواء على مدار العام w . في ألمانيا تتمتع المناطق القريبة من الشاطئ (شمال ألمانيا) بسرعة رياح w أكبر من 6 m/s. وفي الجبال الوسطى (أعلى من 1000 m) تتراوح قيمة w بين 4 و 5 m/s. ومنذ عام 1992 فقد تم في ولاية (Brandenburg) تركيب أكثر من مئة محطة رياح.

أنواع محطات الرياح

يبين الشكل (6.11) أنواع محطات الرياح بشكل تخطيطي مبسط. تتألف محطة الرياح الحديثة (وفقاً للشكل 7.11) ذات المحور الأفقي من عنفة هوائية ذات ثلاثة أجنحة (شفرات) أو جناحين (دوار rotor) مع مولد ومحور وعلبة سرعة وتجهيزات للتحكم والتشغيل.

تقسم محطات الرياح وفقاً لاستطاعتها إلى الفئات التالية:

- محطات الرياح الصغيرة التي استطاعتها 10 إلى 50 kW وقطر دوارها (rotor) 1 إلى 6 أمتار.
 - محطات الرياح المتوسطة، استطاعتها 50 إلى 500 kW وقطر دوارها (rotor) 16 إلى 50 m.
 - محطات الرياح الكبيرة، استطاعتها 500 إلى 5000 kW وقطر الدوار 50 إلى 130 m.
- ويتراوح ارتفاع المراج بين قيمة قطر الدوار وضعفها. وأكبر محطة رياح في أوروبا تعمل الآن في الدانمارك (Tjaereborg) واستطاعتها الكهربائية 2MW وقطر دوارها 60 m.

تحديد استطاعة العنفة الهوائية

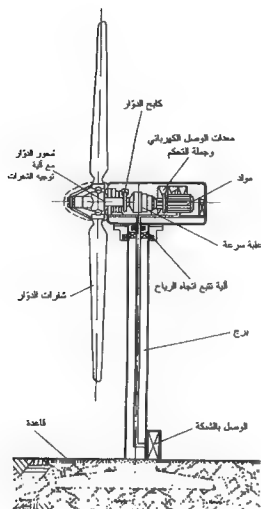
من معادلة العمل المتواصل (Continuity equation) فإن التدفق الكتلي للهواء عبر عنفة هوائية من أجل جريان غير قابل للانضغاط (أي باعتبار الكتلة النوعية للهواء مقدراً ثابتاً $\rho_a = \text{const}$):

(3.11)

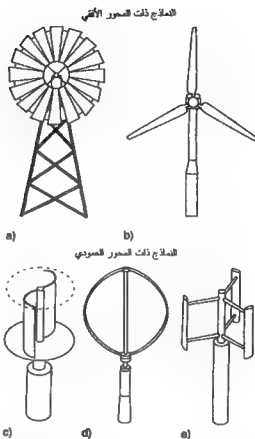
$$m = \rho_a A_1 w_1 = \rho_a A_2 w_2$$

حيث A_1 ، A_2 مساحة مقطع الجريان قبل العنفة الهوائية وبعدها

w_1 ، w_2 سرعة الرياح قبل العنفة الهوائية وبعدها.



الشكل 7.11 : محطة رياح ذات محور أفقي.



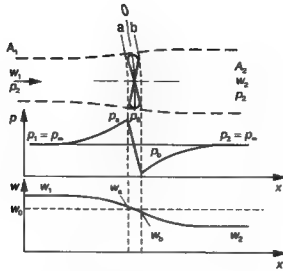
الشكل 6.11 : أنواع محطات الرياح (a) الدوارة البطيئة،
عنفات هوائية أميركية (b) الدوارة السريعة ذات شفرة أو
الشفرتين أو الثلاث شفرات (c) دوارة سافوتوس* (d)
دوارة ديروس (e) دوارة H ديروس.

يبين الشكل (8.11) تغيرات الضغط والسرعة عند الجريان عبر عنفة هوائية. من معادلة برنولي يمكن حساب مركبة القوة المؤثرة على الدوار (rotor)، باتجاه حركة الجريان، وذلك بفرض أن الجريان يتم دون احتكاك وثابت الضغط ($p_1 = p_2$):

$$(4.11) \quad F_2 = \rho_a (w_1^2 - w_2^2) / 2 \quad [N]$$

حيث: A مساحة سطح الدوار $[m^2]$.

* مهنلى فنلندي — المترجم



الشكل 8.11 : تغيرات الضغط والسرعة عند الجريان عبر عنفه هوائية.

وتنتج استطاعة العنفة الهوائية من الفرق بين استطاعة الريح قبل الدّوار وبعدها.

$$(5.11) \quad P_T = m (w_1^2 - w_2^2) / 2 \quad [W]$$

وعملياً تحسب استطاعة العنفة الهوائية P_T كما يلي:

$$(6.11) \quad P_T = 0.5 C_p A \rho_a w^3 \quad [W]$$

حيث: C_p قرينة الاستطاعة

w سرعة الريح [m/s].

قرينة الاستطاعة

من المعادلتين 5.11 و 6.11 ينتج أن قرينة الاستطاعة C_p هي النسبة بين الاستطاعة في واحدة المساحة للدوار $P_T = P_T / A$ والاستطاعة في واحدة المساحة للريح، وهي تحسب كما يلي:

$$(7.11) \quad C_p = 0.5 (1 + w_2 / w_1) (1 - w_2^2 / w_1^2)$$

يبين الشكل (9.11) قرينة الاستطاعة C_p لأنواع الدوارات المختلفة وعلاقتها برقم سرعة الدولاب $\lambda = u / w$ (حيث u السرعة المحيطة للدوار و w سرعة الريح). تبلغ القيمة الأعظمية النظرية لـ $C_p = 16/27 = 0.593$. تصل قيمة C_p في دوار ذي شفتين إلى حوالي 0.45.

عزم الدوران

عند سرعة دوران n (s⁻¹) للدوار فإن العزم المؤثر يبلغ:

(8.11)

$$M = P_T / 2 \pi n \quad [\text{N m}]$$

يُحسب عزم الدوران عند معرفة السرعة المحيطية وسرعة الدوران للدوار كما يلي:

(9.11)

$$M = P_T / \omega = P_T R / u = 0.5 C_p A \rho_a w^2 R / \lambda \quad [\text{Nm}]$$

حيث: P_T استطاعة العنفة الهوائية [W]

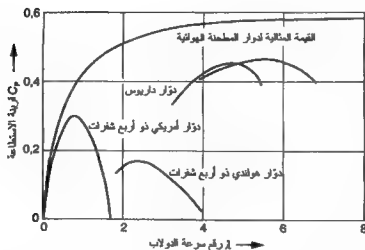
ω سرعة الدوران للدوار [s^{-1}]

R نصف القطر [m]

u السرعة المحيطية للدوار عند نصف القطر R [m/s]

w سرعة الرياح [m/s]

λ رقم سرعة الدولاب (w/v).



الشكل 9.11 : قرينة الاستطاعة C_p وعلاقتها برقم سرعة الدولاب λ للعنفة الهوائية (أنواع الدورات المختلفة).

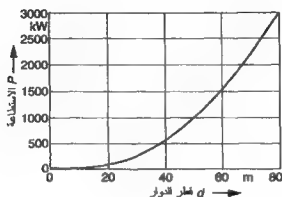
التصميم

يبين الشكل (10.11) العلاقة بين قطر الدوار d واستطاعة العنفة الهوائية P . كما يبين الجدول

(3.11) القيم التصميمية لمخطة ريحية باستطاعة 600 kW.

إذا كان تصميم المنشأة يتضمن ثلاث شفرات مع محور صلب شفرات مع محور صلب، وكانت الشفرة مصنوعة من البولستر المقسى بخيوط زجاجية GFK، فيمكن الحصول على استطاعة مثلى

عند الحملات الدنيا للمنشأة. ونبين فيما يلي مواصفات محطة الرياح: الاستطاعة الاسمية 600 kW
عند $w = 14.5 \text{ m/s}$ ، سرعة الوصل 4.5 m/s، سرعة الفصل 25 m/s، سرعة التحمل (سرعة الرياح
التي تتحملها المنشأة دون أن تنهار) 57 m/s.



الشكل 10.11 : استطاعة العنفة الهوائية وعلاقتها بقطر الدوار d.

يتم الانطلاق عند تصميم محطة الرياح من حوالي 2500 ساعة استفادة في العام في مواقع تبلغ
السرعة الوسطية للرياح فيها 6 m/s.

الجدول 3.11: القيم التصميمية لمحطة الرياح AN BONUS 600 kW

الوصف	القيمة
1. قطر الدوار	41 m
عدد الشفرات	ثلاث مصنوعة من بوليستر مسلح بحيط زجاجية GFK، الطول 19 m
عدد الدورات	30 min^{-1}
تنظيم الاستطاعة	مستقر، مربوط ذو زاوية معايرة ثابتة
2. المولد	ترمزي (توافقي) (Synchronous)، 600 kW، 50 Hz، 1500 min^{-1}
3. علية السرعة	ثلاثية المراحل، نسبة التمشيق 1:50
الوصل بين المولد والمحرك	وصل مرن
4. التحكم	حزمة ذات معالج صغير (microprocessor)
5. العرج	أنبوب فولاذي بارتفاع 40 m وارتفاع المحور 42.3 m

يتعرض توليد الطاقة في محطات الرياح لتغيرات كبيرة، وهذا يتطلب تنظيم سرعة الدوران
والاستطاعة للمحطة. ثمة نوعان مستخدمان للتحكم: في النوع الأول تخفض سرعة الدوران بتقليل

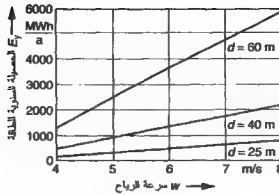
الهواء المندفِع نحو رؤوس الشفرات (التحكم المستقر). وفي النوع الثاني تنخفض سرعة الدوران عن طريق تغيير زاوية شفرات الدولاب الدوار (التحكم بالخطوة Pitch).
يبين الجدول (4.11) المواصفات الفنية لمُحطة رياح استطاعتها الكهربائية 500 kW.
الجدول 4.11: مواصفات محطة رياح باستطاعة 500 kW.

طبقة (نوع) العتلة الهوائية	500	1000	1500	2000
الاستطاعة الاسمية، kW	500	1000	1500	2000
السرعة الاسمية للرياح، m/s	13	15-14	5	15
سرعة الرياح عند الوصل/الفصل، m/s	25/4	25/3	25/4	21/3
قطر الدوار، m	40-36	55-53	65-63	60
عدد الشفرات	3/2	3/2	3	2
عدد دورات الدوار، min ⁻¹	30- 20	25-17	20-14	30
طريقة تقليل (التحكم) الاستطاعة	Pitch/stall	stall	Pitch/stall	stall
ارتفاع العرج/ والمحرور m	50- 40	58	60	66

الحصيلة السنوية للطاقة

تتمدد الحصيلة السنوية للطاقة التي تنتجها محطة رياح (الإنتاج السنوي) عن طريق المقدرة على تقديم الاستطاعة النوعية e_p ، أي كمية الطاقة التي تُكسب في العام من كل 1 m² من سطح الدوار. تتراوح e_p وفقاً للسرعة الوسطية للرياح بين 250 و640 kWh لكل 1 m² من سطح الدوار خلال العام وذلك من أجل محطات الرياح الصغيرة والمتوسطة.

تبلغ الحصيلة السنوية للطاقة لمحطة رياح باستطاعة $P_T = 175$ kW (قطر دوارها 25 m) $E_y = 160$ MWh/a عند سرعة $w = 4$ m/s و 680 MWh/a عند سرعة $w = 8$ m/s. وبسبب ارتفاع سرعة الرياح عند الارتفاع عن سطح الأرض فإن المقدرة على تقديم الاستطاعة النوعية تزداد في المحطات الكبيرة لتصبح $e_p = 1.5$ MWh لكل 1 m² في عام. لهذا فإن محطة رياح قطر دوارها 80 m واستطاعتها 3 MW تكون الحصيلة السنوية التي تنتجها $E_y = 2.7$ GWh/a عند $w = 4$ m/s وتكون قيمة $E_y = 11$ GWh/a عند $w = 8$ m/s. وعندما يكون القطر 100 m ($P_T = 5$ MW) يفترض أن تصل قيمة E_y إلى 4.5 GWh/a عند $w = 4$ m/s و 19 GWh/a عند $w = 8$ m/s. إن الحصيلة السنوية لطاقة محطة رياح E_y تابع لسرعة الرياح w وقطر الدوار d كما يبين ذلك الشكل (11.11).



الشكل 11.11 : الحصلة السنوية لطاقة عجلة رياح وعلاقتها بسرعة الرياح w وقطر الدوار d .

في عام 1992 أنتجت 3440 عتفة مركبة في كافة أنحاء العالم مجموع استطاعتها 46 MW كمية 800 GWh/a من الطاقة كهربائية.

تتراوح أكبر القيم للاستطاعات الإفرادية بين 500 و 3200 kW. وقد اكتسبت العتفات الهوائية الدانماركية شهرة واسعة، وهي تورد إلى كافة أنحاء العالم، وتعمل في الدانمارك منذ عام 1988 مزرعة ريحية (Wind Farm) فيها عتفتان استطاعة كل منهما 630 kW، وقطر الدوار 40 m بالإضافة إلى 5 عتفات استطاعتها 750 kW. أكبر عتفة هوائية في العالم هي MOD-5 ذات الاستطاعة الكهربائية 3.2 MW وقطر الدوار 98 m وضعت في الخدمة في هاواي عام 1987 وهي قيد العمل حتى الآن، وهذه العتفة تمثل الجيل الثالث من عتفات الرياح. من عتفات الجيل الثاني هناك عتفة استطاعتها 2 MW وقطر دوراها 61 m في نورث كارولينا (USA) وأكبر عتفات أوروبا (2 MW، قطر الدوار 60 W) في Tjaereborg (الدانمارك). يصل ما تولده عتفة Taereborg من الكهرباء في العام إلى حوالي 3.4 GWh/a.

التكاليف

تبلغ تكاليف عتفة رياح باستطاعة 300 kW مبلغ 627 DM لكل 1 m² من سطح الدوار أو 1580 DM لكل 1 kW استطاعة، أما تكاليف التشغيل فتبلغ 0.006 إلى 0.008 DM/kWh. وبحسب الموقع يتراوح توليد الكهرباء السنوي من 500 إلى 600 MWh/a، وتكاليف التوليد 0.17 DM/kWh. تبلغ المساحة اللازمة للدوار من أجل كل 1 kW استطاعة حوالي 2.5 m². كما تبلغ القيم الوسطية لـ 8 مزارع ريحية في إقليم Elsom (الدانمارك) كما يلي: 240 جهازاً، الاستطاعة الإجمالية: 42.7 MW، الاستطاعة الوسطية 178 kW، التكاليف الاستثمارية:

2100 DM/kW، التوليد السنوي التوعى للكهرباء 2005 kWh/a، تكاليف الطاقة المولدة 0.11 إلى 0.13 DM/kWh. يعتبر النموذج الأمثل للنفقات في الدائرك باستطاعة 1 MW وبقطر للدوار قدره 50 m. ومن المزمع إجراء تطويرات بحيث تصبح الاستطاعة الإجمالية 1.5 MW بحيث يصل الإنتاج السنوي للكهرباء 3.5 GWh/a عام 2000 في الدائرك. وسيمثل هذا 9.3 % من التوليد الإجمالي فيها.

مثال 2.11

يُطلبُ حساب قطر الدوار لمخطة رياح استطاعتها 250 MW في موقع تبلغ السرعة الوسطية للرياح فيه $w = 12 \text{ m/s}$. قرينة الاستطاعة $C_p = 0.43$ وفترة الاستخدام السنوية $t_y = 2400 \text{ h/a}$. كذلك يُطلبُ تحديد الاستطاعة على واحدة السطح P_T والحصيلة السنوية E_y وعزم الدوران M عند سرعة دوران للدوار تبلغ 50 s^{-1} . الكتلة النوعية للهواء $\rho_a = 1.205 \text{ kg/m}^3$ عند درجة الحرارة 20°C .

الحل

1. تُحسب الاستطاعة عند واحدة السطح كما يلي:

$$\begin{aligned} P_T &= 0.5 C_p \rho_a w^3 \\ &= 0.5 \times 0.43 \times 1.205 \text{ kg/m}^3 \times (12 \text{ m/s})^3 \\ &= 447.68 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

2. تحسب مساحة الدوار كما يلي:

$$\begin{aligned} A &= P_T / p_T \\ &= 250 \text{ kW} / 447.68 \text{ W/m}^2 = 558 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

3. قطر الدوار:

$$D = \sqrt{4A/\pi} = \sqrt{4 \times 558/\pi} = 26.7 \text{ m}$$

4. الحصيلة السنوية للطاقة:

$$\begin{aligned} E_y &= P_T t_y = 250 \text{ MW} \times 2400 \text{ h/a} \\ &= 600 \text{ MWh/a} \end{aligned}$$

* التوقعات كانت في عام تأليف الكتاب 1997 — المترجم

5. عزم الدوران:

$$M = P_T / 2 \pi n = 250 \text{ kW} / 2 \pi \times 50 \text{ s}^{-1} = 796 \text{ Nm}$$

3.11 طاقة باطن الأرض الحرارية (الجيوحرارية)*

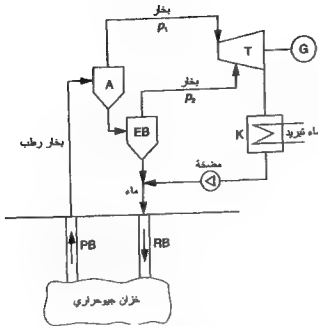
تسود في مركز الأرض جِراء تفكك النظائر درجة حرارة تصل إلى 10000 °C، وهكذا ينشأ تيار دائم من الطاقة يبلغ $4.2 \times 10^{10} \text{ kW}$ كثافته الوسطية 0.063 W/m^2 . ويتطلب استثمار حرارة الأرض لتوليد الطاقة أماكن ذات تدرج (gradient) عالٍ غير عادي للدرجة الحرارة يبلغ 0.3 K لكل 1 m من العمق.

تعمل في العالم محطات كهربائية تستفيد من طاقة باطن الأرض (جيوحرارية) باستطاعة إجمالية 5000 MW، ففي الولايات المتحدة 1350 MW والفلبين 784 MW وإيطاليا 455 MW، وفي كل من اليابان والمكسيك ونيوزيلندا حوالي 205 إلى 218 MW. أما أكبر المنشآت فهي The Geysers في الولايات المتحدة (674 MW) و Laderello في إيطاليا (420 MW) تبلغ تكاليف التوليد من الطاقة الجيوحرارية 0.04 DM/kWh (أسعار عام 1985)، كذلك تستخدم حرارة الأرض إضافة إلى توليد الكهرباء في تأمين التدفئة. فمثلاً تؤمن التدفئة في Reykjavic (عاصمة أيسلندا) من حرارة الأرض.

تستخدم لتوليد الكهرباء دورة البخار.

وبين الشكل (12.11) مبدأ العمل وبنية المحطة الجيوحرارية. يستخرج البخار المسخن من خزان جيوحراري عن طريق ثقب (فتحات). يندفع من الثقب خليط من الماء والبخار مع مواد معدنية منحلة (NaCl، KCl... إلخ) وغازات غير قابلة للتكاثف (CO_2 و H_2S). يُحرر البخار من الماء عن طريق فاصل يعمل بالطرد المركزي (Separator). ويستخدم لمكافحة الضجيج كاتم خاص. يسترجع الماء من الفاصل مع ماء العنفة والمكثف وتعاد هذه المياه لتتحقق ثانية في الفتحات إلى الخزان الجيوحراري. عن طريق تمدد البخار المشبع الذي تبلغ درجة حرارته 200 °C وضغطه حتى 15 bar في عنفة بخارية يتم كسب عمل وتوليد الكهرباء بواسطة المولدة الكهربائية.

* Geothermal Energy — المترجم.



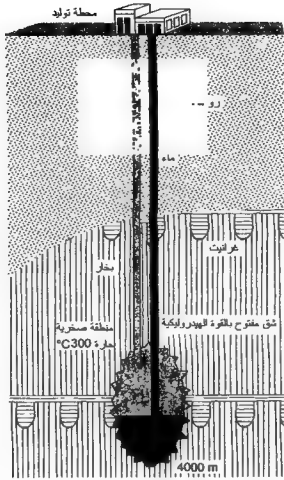
- A: معالج للماء
EB: خزان تمدد
T: عنفة بخارية
C: مكثف
PB: فتحة إقناج
RB: فتحة إعادة الحقن

الشكل 12.11 : مبدأ العمل والتركيب الأساسي لمخطة توليد كهرباء جيولوجية.

للاستفادة من حرارة الأرض عن طريق صخور جافة ساخنة تستخدم طريقة (Hot dry rock) HDR، والشكل (13.11) يمثل هذه الطريقة بشكل تخطيطي. عن طريق فتحة إعادة حقن يُضخّط الماء البارد خلال شق موجود في صخور مسامية على عمق عدة كيلومترات، وبهذا تزداد قابلية الصخور للتميرير وبواسطة فتحة إنتاج يُساق الماء المسخن بواسطة حرارة الأرض إلى عجلة الطاقة. يعتبر استخدام هذه التقنية عند استطاعة حرارية قدرها 100 MW اقتصادياً. الجدول (5.11) يتضمن مواصفات أكبر ثلاث محطات طاقة جيولوجية.

الجدول 5.11: معطيات أكبر ثلاث محطات طاقة جيولوجية

الموقع	درجة حرارة البخار [°C]	الاستطاعة [MW]	المخطة
600	200	400	Lardarello (إيطاليا)
800	230	200	Wairakei (نيوزيلندا)
1500	250	600	The Geysers (الولايات المتحدة)



الشكل 13.11 : طريقة المصهور الجافة الساخنة (Hot-dry-rock).

4.11 طاقة الأمواج والمدّ والجزر

طاقة الموج وجريان ماء البحر

تنشأ أمواج البحر بفعل الرياح، وتمتلك هذه الأمواج طاقة كامنة وحركية. يبلغ إجمالي تدفق الطاقة بسبب جريان الهواء والبحار حوالي 2.10^{12} kW. إن الأماكن ذات الرياح العالية السرعة والشواطئ الحرة للمقابلة لبحر مفتوح مناسبة لاستخدام طاقة الأمواج. وعند ارتفاع 1.5 m فإن الموجة تكتسب خلال 6 أو 7 ثواني استطاعة مساوية لـ 14 kW لكل m من طول الشاطئ، فإذا اعتبرنا طول الشاطئ بالكامل فيمكن أن تكون الاستطاعة عالية إلى حد ما. إلا أنه لا توجد حتى الآن آلات عملية تقوم بهذا. وتستخدم في فرضية ممكنة من هذا النوع زعانف موصولة بطول

10 m وعرض 20 إلى 40 m [1.11]، ويبدو أن من الممكن تصنيع منشأة باستطاعة 1 MW بهذه الطريقة رغم طبيعة العمل المتقطعة والتأرجح الكبير في هذه الطاقة، بالإضافة إلى العوائق المتعددة التي تقف في وجه تطبيق المشاريع المختلفة ذات محاور الكامات الطافية والطوافات الحلقية والطوافات على شكل سفينة... إلخ [1.11]. إن الحصول على طاقة من جريان ماء البحر، مثل تيار الخليج أو تيار Kuroshio، مرتبط بمشاكل فنية أكثر من الحصول على طاقة الأمواج. وبموجب مشروع موجود في أمريكا (USA) فإنه يتم تحويل طاقة الحركة لتيار الخليج في صف من العنفات المائية تتوضع دون مستوى الماء قطرها 150 m. إذا اعتبرنا سرعة الماء 2.5 m/s فستكون استطاعة العنفات 75 MW، أي أنه من أجل الحصول على استطاعة قدرها 1200 MW فستلزم 15 عنفة من هذا النوع.

طاقة المد والجزر Tidal Power

تنشأ هذه الطريقة جراء الجاذبية المتبادلة بين الأرض والقمر والشمس، وهناك أماكن معينة فقط في العالم مناسبة لاستخدام طاقة المد والجزر. والفكرة هي استخدام التغير الشديد لوضع الماء في بعض المناطق من الشاطئ التي يصل فيها ارتفاع المد إلى عشرة أمتار أو أكثر، وتقدر الاستطاعة العالمية الكامنة وفق هذه الطريقة بـ 40 GW (استطاعة كهربائية). أما عيب محطات توليد الطاقة عن طريق المد والجزر فهو تقلب العمل (Periodical operation).

وهناك حالياً على مستوى العالم محطتا توليد للكهرباء باستخدام طاقة المد والجزر.

— محطة في ST. Malo (فرنسا) ذات استطاعة كهربائية قدرها 240 MW (24 عنفة كل منها استطاعتها 10 MW)، يقوم سد التخزين التابع لها بجمع 200 مليون متر مكعب في حوض تخزين، وارتفاع المد يصل إلى 12 أو 13 m والطاقة المولدة سنوياً 500 GWh (قارن هذه القيمة مع 2100 GWh التي تولدها محطة توليد الطاقة المائية العادية).

— المحطة التجريبية ذات الاستطاعة الكهربائية 800 kW في Kisbubsk (روسيا).

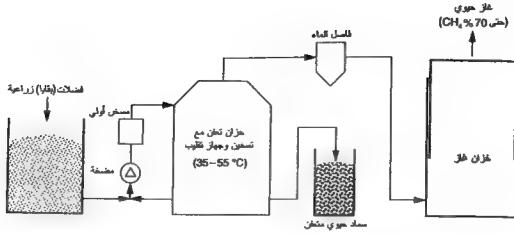
وهناك خطط لبناء منشآت ذات استطاعة إجمالية قدرها 3 GW في بريطانيا و 6 GW في كندا.

5.11 استخدام طاقة الكتلة الحيوية

تنشأ الكتلة الحيوية عن طريق التمثيل الضوئي الذي يحول تدفقاً من الطاقة قدره $10^{11} \times \text{kW}$ إلى مواد نباتية حية. يبلغ للمخزون العالمي من الكتلة الحيوية على اليابسة فقط حوالي 2000 مليار

طن، وهذا يعادل مخزوناً من الطاقة قيمته $10^{22} \times 3 \text{ J}$. يبلغ مكافئ الطاقة لنمو الكتلة الحيوية في العام $10^{21} \times 3 \text{ J}$ ، وهذا يوافق مردود استخدام للطاقة الشمسية قيمته 0.5% للغابات وللماء الحلو. يستخدم حالياً فقط 1% من الكتلة الحيوية في العالم لأغراض الطاقة. يمكن زراعة الأشجار سريعة النمو أو قصب السكر لقصب السكر أو الزيت بفرض استخدام طاقة الكتلة الحيوية. لقصب السكر والشوندر السكري مردود استخدام للطاقة الشمسية قيمته 5%. إن القدرة الاقتصادية لإنتاج الكتلة الحيوية ضئيلة. أما تركيب الكتلة الحيوية فهو وسطياً كالتالي: 65% سيلولوز، 17% هيميسيلولوز (نصف سيلولوز)، 17% خشب، 2 إلى 6% مواد معدنية أو مواد أخرى. وهناك شكل آخر للكتلة الحيوية هو المخلفات (الفضلات) النباتية والحيوانية. يمكن في ألمانيا وحدها إنتاج طاقة سنوية تكافئ طاقة 10 مليون طن من الفحم الحجري عن طريق فضلات الكتلة الحيوية وهذا يكافئ 3% من استهلاك الطاقة الأولية.

لتحويل الكتلة الحيوية يمكن استخدام الطرق البيولوجية — الكيميائية الحيوية والظرف الفيزيائية — الترموديناميكية. يتم في المرحلة الأولى تحويل الكتل الحيوية إلى حوامل للطاقة عند درجات حرارة منخفضة بواسطة كائنات حية صغيرة (مجهرية). يستخدم لأغراض هندسية الغاز الحيوي وغاز الإيثان الناتجان عن ميكروبات التفكيك أو تغيير التركيب (عن طريق الخمائر أو الأنزيمات) للكتلة الحيوية الحاوية على الفحوم الهيدروجينية عند نقص الهواء (لا هوائية) في وسط مائي. في بكتيريات النسيج الأوسط للنبات تبلغ فترة التخمر 20 إلى 30 يوماً، تكون درجة حرارة العملية 20 حتى 40°C، أما بكتريات الوسط الدافئ فتبلغ فترة تخمرها 3 إلى 10 أيام عند درجة حرارة 45 إلى 60°C. ويبين الشكل (14.11) تخطيطاً منشأة حيوية تعمل بشكل متواصل. تتراوح كمية الغاز الحيوي الذي يتم كسبه بين 0.3 — 0.4 و 0.4 — 0.7 m^3 لكل kg كتلة جافة من الفضلات الحيوانية والزراعية. وإنتاج الغاز الحيوي يمكن استخدام الفضلات النباتية والروث والوحل الناتج عن معالجة مياه المجاري الصناعية أو البلدية (للمدينة) والقمامة والبقايا النباتية للمنتجات الغذائية. يبلغ محتوى الغاز الطبيعي من CH_4 60 إلى 70%، أما قيمته الحرارية الدنيا فهي 20 حتى 30 MJ/m^3 . من مركبات الغاز الحيوي هناك CO_2 (حتى 35%) بالإضافة إلى كلٍّ من H_2 و N_2 بنسبة 0.2 لكل منها 0.1% H_2S . وبناءً على مجال الاستخدام فإن الغاز الحيوي الحام يجفف ويُخلص من الكبريت، وعندئذٍ يمكن استخدامه في محطات التدفئة وتوليد الكهرباء.



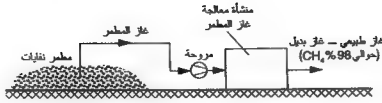
الشكل 14.11 : مخطط منشأة حيوية.

تُحرق الكتلة الحيوية (الخشب، فضلات الخشب، القمامة، الفضلات) إما مباشرة أو تحول أولاً إلى منتجات ثانوية (غاز حيوي، غاز مطامر الفضلات أو منشآت معالجة المجاري، الكحول، غاز أو زيت التحلل الحراري).

تُحوّل الكتلة الحيوية بطرق فيزيائية — كيميائية حرارية إلى طاقة أو حامل للطاقة — وأكثر الطرق انتشاراً هي التحضير الميكانيكي للكتلة الحيوية، مثل إعطاء بقايا الخشب والقش شكل كرات صغيرة أو قوالب أو مثل استخلاص الزيوت النباتية أو الهيدروكربونات، كذلك إحراق الخشب والفضلات لتوليد الكهرباء والحرارة وتحويل الخشب والفضلات إلى غاز وتحويل الكتلة الحيوية إلى سائل (تسييمها).

يصل المار-رد عند بوريد الكهرباء إلى حوالي 20 %، وعند توليد الحرارة إلى 70 %. يمكن تحويل الكتلة الحيوية إلى غاز بمردود تحويل يصل إلى 70 — 80 %، وذلك باستخدام الهواء لإنتاج غاز المولدات الذي قيمته الحرارية الدنيا حوالي 5 MJ/m³، وعند استخدام البخار والأكسجين ينتج غاز صناعي (مزيج من أول أكسيد الكربون والهيدروجين). يُولّد من الكتلة الحيوية وقود سائل أو صلب أو غازي عن طريق التحلل الحراري أو التقطير التفكيكي أو بواسطة سحب الغاز في جو خال من الهواء ودرجة الحرارة من 300 حتى 1000 °C.

ينتج سنوياً 500 kg من القمامة لكل فرد وينشأ من 1000 kg قمامة منزلية حوالي 8 m³/a غاز مطامر، الذي يمكن استخدامه للتدفئة وتوليد الكهرباء.



الشكل 15.11 : مخطط منشأة غاز المطر.

يحتوي الغاز الناتج عن مطر فضلات حوالي 59% ميثان CH_4 وحوالي 40% ثاني أكسيد الكربون CO_2 ، وحوالي 1% آزوت (نتروجين) N_2 وأثاراً من الفحوم الهيدروجينية الثقيلة C_mH_n وكبريت الهيدروجين H_2S (ضار)، وروابط كبريت عضوية و فحوم هيدروجينية هالوجينية، وهذا الغاز الناتج عن المطامر غاز ضعيف له قيمة حرارية دنيا تبلغ $5 MJ/m^3$. عند وجود كميات كبيرة في المطامر يمكن معالجة غاز المطر وتحويله إلى غاز طبيعي — غاز بديل. ويمكن إغناء الغاز بامتصاص ثاني أكسيد الكربون منه أو بإضافة الميثان له (حوالي 98%). تقدم أكبر منشأة في العالم لتوليد غاز المطر (توجد في Freshkills قرب نيويورك) حوالي $52 \times 10^6 m^3/a$ من الغاز الطبيعي — الغاز البديل وتحقق هذه الكميات بشبكة الغاز الطبيعي العامة. يبين الشكل (15.11) بشكل تخطيطي منشأة لغازات المطامر.

12 تخزين الطاقة

1.12 طرائق تخزين الطاقة ومعايير تقويمها

طرائق تخزين الطاقة

- يرفع تخزين الطاقة الجاهزة وإمكانية استخدام هذه الطاقة، ووفقاً لشكل الطاقة يُميز بين:
- خزانات الطاقة الميكانيكية (الدولاب المعدل أو الحداقة، أحواض التخزين بالضغط، خزانات الهواء المضغوط)،
 - خزانات الطاقة الحرارية،
 - البطاريات الكهربائية، المدخرات (المركبات) وخزانات الحقل المغناطيسي.

معايير التقويم

تتميز خزانات الطاقة بالمعايير التالية:

- المحتوى الحراري أو سعة التخزين،
- الكثافة النوعية لطاقة الخزان،
- استطاعة التعبئة/ الشحن والتفريغ،
- فترة تخزين الطاقة،
- درجة الاستخدام (الاستفادة)،
- التكاليف الاستثمارية والعمر وفترة استرجاع التكاليف الاستثمارية (amortization).

سعة التخزين وكثافة الطاقة

يُعرف محتوى الطاقة أو سعة التخزين بأنه كمية الطاقة الأعظمية التي يمكن جمعها في خزان طاقة ذي نوع وحجم معين خلال دورة العمل.

أما الكثافة النوعية للطاقة لخزان طاقة ما فهي محتوى الطاقة بالنسبة لكل kg أو m³، ويعطي الجداول (1.12) الكثافة النوعية للطاقة لمختلف أنواع خزانات الطاقة.

الجدول 1.12: الكثافة النوعية للطاقة في خزانات الطاقة.

خزان الطاقة	كثافة الطاقة [Wh/kg]
خزانات الحرارة المحسوسة ($\Delta t = 50K$)	
ماء	58
الببتون، الصخر، الحصى	13
الحديد	8
تربة (حصىات خشنة)	25
خزانات الحرارة غير المحسوسة (latent) (حرارة لانشر	
ماء)	
الثلج (درجة ذوبانه 0°C)	93
البارافينات (درجة ذوبانها 42 - 67°C)	47-52
هيدرات الأملاح اللاعضوية (درجة الذوبان 29 - 70°C)	48-70
فلوريد الليثيوم LiF (درجة الذوبان 848°C)	283
خزانات الطاقة الميكانيكية	
حوض التخزين بالضخ، الارتفاع 300 m	0.81
الدولاب المعدل (الحداقة)	30 - 20
الوقود الاصطناعي/الهيدروجين	
الهيدروجين السائل	33000
الهيدروجين، هيدرات المعادن	600-2500
الميثانول	7390
الإيثانول	7695
البطاريات (الركمات)	
الرصاص - حمض الكبريت (20 - 30°C)	40
النيكل - الحديد	60
النيكل - الكادميوم	100
Na-S و 4-S (300 - 375°C)	150

استطاعة التعبئة / الشحن والتفريغ

تُعرف كمية الطاقة التي تقدم إلى خزان الطاقة أو تُستخرج منه في واحدة الزمن بأنها استطاعة التعبئة / الشحن أو التفريغ حسب الحال، وهي مقدار تابع للزمن، وتكون استطاعة التعبئة / الشحن والتفريغ في بداية أي عملية أكبر منها في نهايتها.

خزانات الطاقة القصيرة أو الطويلة الأمد

يُميز وفقاً لفترة التعبئة / التخزين بين الخزانات القصيرة أو الطويلة الأمد، وتتألف دورة عمل خزان ما من:

— الشحن بنقل الطاقة من منبع للطاقة

— التخزين (مرحلة الركود) بدون إضافة أو طرح للطاقة

— التفريغ نتيجة استحرار الطاقة ووضعها بتصرف المستهلك.

تتألف دورة العمل τ_c من زمن الشحن t_{ch} وزمن التخزين (الركود) $\tau_{storage}$ وزمن التفريغ τ_{dch} .

درجة الاستخدام (الاستفادة)

درجة استخدام خزان طاقة η_s هي نسبة كمية الطاقة المستخرجة E_R إلى كمية الطاقة المقدمة E_S بالنسبة إلى دورة العمل:

$$\eta_s = E_R / E_S = 1 - E_{los} / E_S \quad (1.12)$$

حيث: E_{los} ضياعات الطاقة.

2.12 خزانات الطاقة الميكانيكية والكهربائية

1.2.12 التخزين بالحدافة (Fly Wheel)، أحواض التخزين بالضغط، التخزين

بالهواء المضغوط

يمكن تخزين الطاقة الميكانيكية باستخدام الحدافة أو أحواض التخزين بالضغط أو بالهواء المضغوط.

التخزين باستخدام الحداقة Fly Wheel

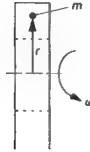
تخزن في الحداقة الطاقة الحركية، وتأخذ الحداقات أشكالاً مختلفة: قرصاً دائرياً أو حلقة دائرية أو قضيباً طويلاً رقيقاً. يبين الشكل (1.12) حداقةً بشكل تخطيطي. يُحسب محتوى الطاقة كما يلي:

$$(2.12) \quad E = \frac{1}{2} M \omega^2 \quad [J]$$

حيث: E محتوى الطاقة

M عزم عطالة الكتلة $[kgm^2]$

ω السرعة الزاوية $[s^{-1}]$.



الشكل 1.12 : خزان يستخدم حداقة على شكل حلقة دائرية.

أما عزم عطالة الحداقة الأسطوانية الشكل فيحسب كما يلي:

$$(3.12) \quad M = \frac{1}{2} m r^2$$

حيث: m الكتلة $[kg]$

r نصف القطر $[m]$.

عند التحميل الكامل تصل الحداقة إلى سرعتها الزاوية الأعظمية ω_{\max} ويصبح محتواها من الطاقة أعظمية:

$$(4.12) \quad E_{\max} = \frac{1}{2} M \omega_{\max}^2 \quad [J]$$

أما الطاقة المستجرة من الحداقة التي تلعب دور خزان طاقة فهي:

$$(5.12) \quad E_{\max} = \frac{1}{2} M (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad [J]$$

حيث: ω_{\min} السرعة الزاوية الأصغرية $[s^{-1}]$.

تُحسب كثافة الطاقة بالنسبة لـ 1 kg كتلة كما يلي:

$$e = E/m = \frac{1}{4} r^2 (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)$$

$$(6.12) \quad = k(\sigma / \rho) \quad [J/kg]$$

حيث: k عامل الشكل (من 0 حتى 1)

σ إجهاد شد المادة المسموح به $[N/m^2]$

ρ الكتلة النوعية للمادة $[kg/m^3]$.

تتحدد قيم e الممكن الوصول إليها بالشكل الهندسي للحدافة وبالمادة المصنوعة منها. الشكل الأمثل ذو $k = 1$ هو القرص ذو المقطع الأسّي والمقاومة المتجانسة. من بين جميع خلاطات المعادن فإن الأقراص المصنوعة من التيتانيوم تتمتع بكثافة طاقة أعظمية تبلغ 220 kJ/kg. للحصول على قيم أعلى، فإنه ينبغي استخدام مواد وصل. فمثلاً تبلغ قيمة e للدولاب المعدل الذي يأخذ شكل حلقة دائرية مصنوعة من الزجاج/الراتنج (Epoxy) 450 kJ/kg وللغرافيت/ راتنج تبلغ 450 kJ/kg.

يبين الشكل (a2.12) محطة تخزين بالضخ، وهي تتألف من حوضي تخزين (علوي وسفلي) وأنابيب ضغط ومضخة/عنف مع محرك/مولد. تُحسب الاستطاعة اللازمة لضخ الماء من الحوض السفلي عبر أنابيب الضغط إلى الحوض العلوي كما يلي:

$$(7.12) \quad P_p = g \rho V H / \eta_p$$

حيث: g التسارع الأرضي $[m^2/s]$

ρ الكتلة النوعية للماء $[kg/m^3]$

V التدفق الحجمي للماء $[m^3/s]$

H فرق الارتفاع $[m]$

η_p المردود الإجمالي للمضخة مع محرك تشغيلها.

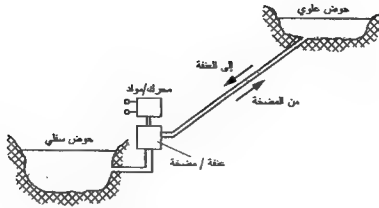
تُحسب الاستطاعة الميكانيكية التي يمكن كسبها بواسطة العنف المائية كما يلي:

$$(8.12) \quad P_T = g \rho V H \eta_T \quad [W]$$

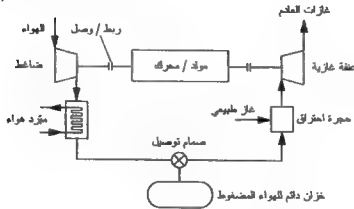
حيث: η_T المردود الإجمالي للعنف.

تكون الاستطاعة الكهربائية P_e أصغر من P_T بمقدار الضياعات في المولد.

أما درجة الاستفادة من محطة التخزين بالضخ فتنتج كنسبة بين الاستطاعة الكهربائية المستفاد منها والطاقة المستهلكة لذلك.



a)



b)

الشكل 2.12 : خزان للطاقة الكامنة (a) ذو أحواض تخزين بالضغط (b) ذو هواء مضغوط.

يمكن تخزين الطاقة الميكانيكية عن طريق ضغط مائع قابل للانضغاط مثل الهواء، والشكل (b2.12) يبين بشكل تخطيطي محطة تخزين بالهواء المضغوط. يُخزن الهواء بعد ضغطه في خزان تحت الأرض، ثم يرسل الهواء ذو الضغط العالي إلى عنفة غازية ليُقدم عملاً ويتمدد إلى ضغط الوسيط المحيط. لتخزين كميات كبيرة من الطاقة يلزم حجم كبير. توجد في العالم الآن جملتان تخزين بالهواء المضغوط إحداهما في ألمانيا والأخرى في الولايات المتحدة. الجملة الموجودة في ألمانيا (Hundorf) تتألف من محطة توليد كهرباء ذات عنفة غازية بالإضافة إلى تجاويف تحت الأرض حجمها المفيد 300000 m^3 عند عمق 650 إلى 800 m. يتم شحن الخزان بالهواء المضغوط (ضغطه 72 bar) في أوقات الحمولة الضعيفة (الاستطاعة 60 MW، تدفق الهواء الكلي 108 kg/s)، وفي الحمولة القصوى يُؤَد تيار بواسطة محطة التوليد ذات العنف الغازية (استطاعة المولد 290 MW). وهكذا

يساق الهواء المضغوط (يتدفق 425 kg/s) من المخزن إلى حجرة الاحتراق ويحرق مع الغاز الطبيعي. تبلغ كثافة الطاقة لمخزن الطاقة 4 kWh/m³، ويتم الحصول على مردود توليد للكهرباء قدره 42 % وكثافة الاستطاعة 1 kW/m³. يسمح حجم التخزين بالتشغيل عند الحمولة الكاملة لمدة أربع ساعات.

وتعمل في الولايات المتحدة الأمريكية حالياً محطة تخزين بالهواء المضغوط استطاعتها 100 MW ذات خزان ضغطه متدرج موجود في تجاويف ملحية.

تُحسب الاستطاعة التي يمكن كسبها بواسطة العنفة الغازية (قارن الفصل السابع) كما يلي:

$$(9.12) \quad P_T = m_T \Delta h_T \eta_T \quad [W]$$

حيث: m_T التدفق الكتلي لغازات الاحتراق في العنفة الغازية [kg/s]

Δh_T هبوط الإنتالي في العنفة عند ثبات الإيزنتروبي [kJ/kg]

η_T المردود الداخلي للعنفة.

الاستطاعة المستهلكة لضغط الهواء:

$$(10.12) \quad P_{comp} = m_{comp} \Delta h_{comp} / \eta_{comp}$$

حيث: m_{comp} التدفق الكتلي للهواء في المضاط [kg/s]

Δh_{comp} تغير الإنتالي في المضاط عند ثبات الانتروبي [kJ/kg]

η_{comp} المردود الداخلي للمضاط.

يُحسب هبوط الإنتالي كما يلي:

$$(11.12) \quad \Delta h = c_p \Delta T \quad [kJ/kg]$$

حيث: c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط

ΔT تغير درجة الحرارة في العنفة الغازية أو المضاط [K].

تعطي النسبة بين P_T المردود الآني (P_{comp} المحظي) لمخزن الهواء المضغوط.

2.2.12 تخزين الطاقة الكهركيميائي

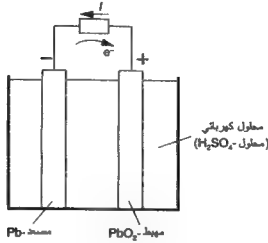
مبدأ تخزين الطاقة الكهربائي الكهيميائي معلوم. تستخدم لتخزين الطاقة الكهربائية مدخرات/بطاريات الرصاص مصنوعة من الرصاص Pb أو Ni-Cd (مركمات) أو غير ذلك، ولتخزين كميات كبيرة من الطاقة تلازم بطاريات تحقق المتطلبات التالية كحد أدنى: الاستطاعة النوعية

50 W/kg، كثافة الطاقة 200 Wh/kg، 1000 دورة كاملة، 4 إلى 6 سنوات كعمر للعمل. يبين الشكل (3.12) مبدأ البطارية التي تعمل بالرصاص وحمض الكبريت.

بحسب التوتر (الجهد) U عند المقاومة الخارجية (الحمولة R_g) كما يلي:

$$U = E - I R_i \quad [V] \quad (12.12)$$

حيث: R_i المقاومة الداخلية للبطارية.



الشكل 3.12 : مخطط بطارية رصاص — حموض.

أما التيار الممكن الحصول عليه فيبلغ:

$$I = E / (R_i + R_g) \quad [A] \quad (13.12)$$

كما يحسب هذا التيار كما يلي:

$$I = n F \quad [A] \quad (14.12)$$

حيث: n عدد مولات الالكترونات لكل مول من حمض الكبريت (يساوي 2)

F ثابت فاراداي 96487 C/Mol

فالاستطاعة الممكن تقديمها تصبح:

$$P = U I \quad [W] \quad (15.12)$$

المثال المعروض أدناه يوضح حساباً لبطارية رصاص — حمض الكبريت (مدخرة رصاصية).

مثال 1.12

مدخرة (بطارية) رصاصية 12-V تقدم تياراً شدته 60 A.

يُطلب حساب الاستطاعة الآتية المقدمة واستهلاك حمض الكبريت عند المصعد (anode).

الحل

$$P = U I = 12V \times 60A = 720 \text{ W}$$

نُحسب الاستطاعة الآتية المقدمة كما يلي:

يُحلّ في كل مول من حمض الكبريت H_2SO_4 مقدار 2 مول الكروونات من مهبط (Cathode) البطارية وينشأ هيدروجين جزئي.

يُحسب استهلاك حمض الكبريت (بالمول) بالتفكك عند المصعد والمهبط للبطارية كما يلي:

$$N_{acid} = 2 I / (n F)$$

حيث: F ثابت فاراداي وتبلغ قيمته 96487 C/Mol

n 2Mol الكروونات / Mol حمض كبريت

$$N_{acid} = 2 \times 60A / (2 \times 96487 \text{ As/Mol}) = 6 \times 34 \cdot 10^{-4} \text{ Mol/s}$$

ويصبح بالتالي التدفق الكتلي لحمض الكبريت:

$$m = N_{acid} M_{H_2SO_4}$$

$$= 6.34 \times 10^{-4} \text{ Mol/s} \times 98 \text{ g/Mol} = 0.06 \text{ g/s} = 0.22 \text{ kg/h}$$

3.12 تخزين الطاقة الحرارية

أنواع خزانات الطاقة الحرارية

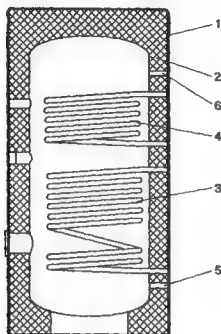
ثمة ثلاثة أنواع من التخزين هي التخزين على شكل حرارة محسوسة، والتخزين على شكل حرارة كامنة، والتخزين الحراري الكيميائي. تقسم الخزانات الحرارية بحسب درجة الحرارة إلى خزانات ذات درجة حرارة منخفضة (درجة الحرارة أدنى من 100 °C وخزانات ذات درجة حرارة متوسطة (من 100 إلى 500 °C)، وخزانات ذات درجة حرارة عالية (فوق 500 °C).

لتخزين الحرارة المحسوسة تستخدم وسائط صلبة وسائلة. يتغير المحتوى الحراري لخزان حرارة محسوسة بتغير درجة حرارة وسيط التخزين. بواسطة انتالبي الانصهار العالي فإنه يمكن الحصول على كثافة طاقة عالية في خزانات الحرارة الكامنة. أما في خزانات الحرارة الكيميائية فتستخدم حرارة التفاعل في التفاعلات الكيميائية العكوسة وتكون كثافة الطاقة أعلى من سابقتها.

خزانات الطاقة الحرارية بالماء الساخن

يجب أن يكون لوسيط التخزين في خزانات الحرارة المحسوسة سعة حرارية عالية، ويستخدم الماء من أجل درجات الحرارة التي تقل عن 100 °C، حيث تبلغ سعته الحرارية النوعية 4.187 kJ/kgK.

يبين الشكل (4.12) بشكل تخطيطي خزان ماء ساخن. أما من أجل درجات الحرارة التي تزيد عن 100 °C فتلزم الخزانات المضغوطة، وتستخدم عندئذ وسائط سائلة أخرى مثل بخار الماء والسوائل العضوية والأملاح والمعادن المصهورة. أما الوسائط الصلبة فتكون من الخرسانة أو التراب أو المواد السيراميكية. يتضمن الجدول (2.12) القيم المميزة لوسائط التخزين عند درجات الحرارة المنخفضة.



1. غلاف الخزان
2. عازل حراري
3. مبادل حراري ذو دورة شمسية
4. تسخين ليلي
5. مدخل الماء البارد
6. تصريف الماء الدافئ

الشكل 4.12 : خزانات الماء الدافئ القصيرة الأمد.

تُحسب سعة التخزين لخزان حرارة محسوسة كما يلي:

(16.12)

$$Q_s = m c (t_{\max} - t_{\min}) = V \rho c (t_{\max} - t_{\min}) \quad [J]$$

حيث: m كتلة وسيط التخزين [kg]

c السعة الحرارية النوعية لوسيط التخزين [J/kgK]

V الحجم [m³]

ρ الكثافة النوعية لوسيط التخزين [kg/m³]

t_{\min} و t_{\max} درجتا الحرارة الأعظمية والأصغرية للخزان [°C].

الجدول 2.12: القيم المميزة لوسائط التخزين في خزانات الحرارة المحسوسة عند درجات منخفضة.

وسيط التخزين	الكتلة النوعية ρ [kg/m ³]	عامل التوصيل λ [W/mK]	السعة الحرارية النوعية c [J/kgK]
ماء	1000	0.68	4187
خرسانة (بيتون)	2400	2.1	1000
صخور - حصى	2750	2.9	890
تربة	2040	0.59	1840

أما الكثافة الحرارية المنسوبة إلى كتلة أو حجم الخزان فهي:

$$(17.12) \quad q = Q / m = c (t_{\max} - t_{\min}) \quad [\text{J/kg}]$$

$$(18.12) \quad q_v = Q / V = \rho c' (t_{\max} - t_{\min}) \quad [\text{J/m}^3]$$

واستطاعتا التعبئة / الشحن والتفريغ للخزان الحراري تحسبان كما يلي:

$$(19.12) \quad Q_{\text{ch}} = m c_p (t_{\text{ent}} - t_{\text{exit}}) \quad [\text{W}]$$

$$(20.12) \quad Q_{\text{d.ch}} = m c_p (e_{\text{exit}} - t_{\text{ent}}) \quad [\text{W}]$$

حيث: m التدفق الكتلي للنقل الحراري [kg/s]

c_p السعة الحرارية النوعية للنقل الحراري [J/kgK]

$t_{\text{ent}}, t_{\text{exit}}$ درجة حرارة الدخول والخروج [°C].

مثال 2.12

ما هي كمية الماء اللازم لتخزين 300 kWh حرارة عندما تتغير درجة الحرارة في الخزان بين 80 °C عند الشحن الكامل و 20 °C عند التفريغ؟ ما هي كثافة الطاقة المنسوبة إلى الكتلة أو الحجم لهذا الخزان؟

الحل

1. الحرارة النوعية للماء عند درجة الحرارة الوسطية $(80 + 20)/2 = 50^\circ\text{C}$ هي $c_p = 4181 \text{ J/kgK}$

والكتلة النوعية عند درجة الحرارة الوسطية هي $\rho = 988 \text{ kg/m}^3$.

2. كمية الماء اللازمة (الكتلة والحجم):

$$m = Q / c_p (t_{max} - t_{min})$$

$$= 300 \text{ kWh} \times 3600 \text{ s/h} / 4.181 \text{ kJ/kgK} (80 - 20) \text{ K} = 4305.2 \text{ kg}$$

$$V = m / \rho$$

$$= 4305.2 \text{ kg} / 988 \text{ kg/m}^3 = 4.357 \text{ m}^3$$

3. لحساب كثافة الطاقة بالنسبة إلى الكتلة أو الحجم نكتب:

$$q = Q / m = 300 \text{ kWh} / 4305.2 \text{ kg} = 0.07 \text{ kWh/kg}$$

$$q_v = Q / V = 300 \text{ kWh} / 4.357 \text{ m}^3 = 68.85 \text{ kWh/m}^3$$

الخزانات الحرارية ذات المواد الصلبة

إن المواد الصلبة كالحرسنة (البيتون) والتربة والحصى والغرانيت مناسبة لتخزين الحرارة عند درجات حرارة منخفضة. في الخزانات الحرارية ذات الأكوام المستخدمة في منشآت التدفئة الشمسية ذات المجمعات الهوائية يُمرَّر الهواء عبر كومة من حبيبات المادة حتى تضاف الحرارة إلى هذه الكومة أو تسحب منها. ونتيجة لارتفاع عامل انتقال الحرارة بين الهواء والمادة الصلبة، وبسبب كبر مساحة سطح الحبيبات، فإن درجة الحرارة بين الهواء والمادة الصلبة صغير. في التوضع الشاقولي المألوف يُمرَّر الهواء الساخن لشحن الخزان من الأعلى، ويمرَّر الهواء البارد لسحب (استخراج) الحرارة من الأسفل. إن درجة حرارة الجزء العلوي للخزان الحراري تكون دائماً أعلى منها في الجزء السفلي.

الخزانات الحرارية الفصلية

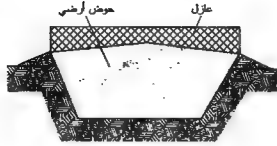
الأنواع الرئيسية لخزانات الحرارة الفصلية هي (الشكل 5.12):

— الخزانات الحرارية في حاويات (صناديق) فوق صناديق

— الخزانات الترابية

— خزانات الماء تحت الأرض (أحواض أرضية، تجاويف صخرية، مستودعات الماء الأرضية).

الخزانات الطويلة الأمد تحفظ الحرارة المحسوسة في الماء بالأحواض أو مستودعات الماء الأرضية ويتراوح حجمها بين 500 m³ و 1200000 m³. تحتاج الخزانات الحرارية الموجودة فوق الأرض حجماً كبيراً وعزلاً حرارياً بالغ الجودة. ولأسباب تتعلق بالمقاومة فإن حجم الخزان المصنوع من الحرسنة أو الفولاذ لا يتجاوز 100000 m³. إن الاستهلاك لمادة العزل عالٍ جداً، ولذلك فإن التكاليف الاستثمارية للخزانات الحرارية الفصلية هي الأعلى بين الطرائق الأخرى. ولتقليل التكاليف تصمم الخزانات الفصلية بحيث تتوضع تحت الأرض.



الشكل 5.12 : خزان الحوض الأرضي للتخزين الفصلي للحرارة.

تُستخدم الأحواض الأرضية المملوءة بالماء كخزانات عالية درجة الحرارة وذات سعة تخزين كبيرة. تكون في الأحواض الأرضية النسبة بين السطح المغطى والحجم عاليةً عند مقارنتها بطرائق التخزين الأخرى. ولذلك يلزم العزل الحراري الجيد للغطاء والجزيئي (على الأقل) للجوانب. إنها تحتاج عزلًا مضمونًا للماء. يجب أن يحقق موقع حوض أرضي متطلبات معينة (القاعدة المستقرة، سهولة الحفر، عدم وجود مياه جوفية).

أما التجاويف الصخرية فهي مناسبة لتخزين الحرارة عند درجات حرارة عالية وبكميات كبيرة. ويتم الحصول على هذه التجاويف عن طريق التفجير أو الحفر ثم غملًا بالماء الساخن القادم من المجمعات. تعمل المادة المحيطة (الفرانيت) كعازل حراري وخزان في نفس الوقت.

المستودع الأرضي (Aquifer) هو بناء جيولوجي يقع تحت الأرض (صخور، صخور رملية، رمل) محاط بمجريان بطيء للمياه الجوفية. ملء الخزان يساق الماء الدافئ من المجمعات الشمسية التي ليس لها غطاء شفاف والمسامة بممتصات الطاقة — عبر فتحات خاصة إلى هذه المستودعات، وبهذا يُزاح الماء الجوفي الموجود في المستودع الأرضي وتدفأ الصخور المحيطة (الصخر أو الرمل). أما تفريغ المستودع الأرضي فيتم إما من نفس فتحات ملئه أو عن طريق فتحات خاصة أخرى يُسترجع منها الماء الدافئ. يتم التخزين في المستودعات الأرضية عند درجات حرارة منخفضة، ويلزم لذلك ساعات تخزين كبيرة أو كبيرة جداً.

خزانات الحرارة الكامنة

من المناسب عند تخزين الحرارة الاستفادة من التغير الطوري: من صلب إلى سائل (الثلوج أو الانصهار) عند التعبئة (الشحن) أو من سائل إلى صلب (التجمد) عند تفريغ الخزان. عند شحن

خزان الحرارة الكامنة يُنوّب وسيط الحرارة الكامنة وعند تفريره يحدث تصلب لهذا المصهور عند ثبات درجة حرارة المصهور t_{melt} (للمواد النقية كيميائياً).
تُحسب سعة التخزين لخزان الحرارة الكامنة كما يلي:

$$Q_s = m [c_{\text{solid}} (t - t_{\text{melt}}) + h_{\text{melt}} + c_{\text{liq}} (t_{\text{melt}} - t_{\text{max}})] \quad [\text{J}] \quad (21.12)$$

حيث: m كتلة وسيط تخزين الحرارة الكامنة

$c_{\text{liq}}, c_{\text{solid}}$ السعة الحرارية النوعية للوسيط الصلب والسائل (على التوالي) $[\text{J/kgK}]$

h_{melt} الانتالي النوعي لانصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة $[\text{J/kg}]$

$t_{\text{max}}, t_{\text{min}}$ درجة حرارة التخزين الأصغرية والأعظمية $[^\circ\text{C}]$

t_{melt} درجة حرارة انصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة $[^\circ\text{C}]$.

من أجل القيم المرتفعة لـ h_{melt} و C فإن الكتلة m والحجم V لوسيط تخزين الحرارة الكامنة اللازمين من أجل سعة تخزين محددة Q_s يكونان صغيرين.

تستخدم في مجال درجات الحرارة المنخفضة ماعاء الأملاح اللاعضوية مثل $\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Mg}$ والحموض الدهنية العضوية والبارافينات.

ويبين الجدول (3.12) كميات وسيط التخزين اللازمة لتخزين الحرارة عند درجات الحرارة المنخفضة.

الجدول 3.12: كميات وسائط التخزين اللازمة لتخزين 1 GW حرارة من أجل فرق في درجات الحرارة قيمته $\Delta t = 30 \text{ K}$.

وسائط تخزين الحرارة الكامنة		وسائط تخزين الحرارة المحسوسة		
بارالين	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10\text{H}_2\text{O}$	المصخور	الماء	
2500	2200	39667	7933	الكتلة $[\text{kg}]$
3.18	1.5	38.1 *	7.93	الحجم $[\text{m}^3]$
* هناك فراغ في كومة المصخور يبلغ 35%.				

إن قيمة إنتالي الانصهار المفيدة والمستخدمة لتخزين الحرارة h_{melt} عند درجات حرارة أدنى من 100°C تكون في أكثر الأحيان أدنى من 100 kWh أو 360 MJ لكل 1 m^3 من وسيط تخزين الحرارة الكامنة. عادةً تضاف الحرارة المحسوسة إلى الحرارة المخزنة والتي يحددها انتشار الحرارة

والسعة الحرارية النوعية. تتعلق كثافة الطاقة النوعية في خزانات الماء الساخن بانتشار الحرارة في الخزان Δt ، فمن أجل $\Delta t = 70 - 20 = 50 \text{ K}$ ، فإن الحرارة المحسوسة تبلغ 58.2 kWh أو 209.3 MJ لكل m^3 ماء.

نشأ في خزانات الحرارة الكامنة ذات درجات الحرارة المنخفضة المشاكل التالية:

- التبريد الإضافي للمصهور إلى ما دون درجة الانصهار عند التفرغ الحراري للخزان.
- التغير الكبير في الحجم لوسيط تخزين الحرارة الكامنة عند تغير حالته الطورية.
- تبادل الحرارة غير المناسب بين الناقل الحراري ووسيط تخزين الحرارة الكامنة.

يُثبت السلوك الكيميائي والفيزيائي لماءات الأملاح اللاعضوية عن طريق إضافة مواد خاصة مناسبة لوسيط تخزين الحرارة الكامنة، وبذلك يرتفع عدد دورات التخزين. هنالك مواد أخرى تُحسن سلوك التبلور لوسيط تخزين الحرارة الكامنة.

وتستخدم في كثير من الأحيان خزانات حرارية ذات مادتين، وهذا يكون إما جمعاً بين وسطي تخزين حرارة محسوسة مثل الماء والخرسانة، أو الحصى أو الرمل مع الزيت. أو جمعاً بين وسطي تخزين أحدهما للحرارة المحسوسة والآخر للحرارة الكامنة مثل الماء والبارافين.

على سبيل المثال تصبح سعة التخزين الإجمالية لخزان فصلي يتألف من عدة فجوات حصى مملوءة بالماء كالتالي:

$$Q_{\text{total}} = (m_w c_{pw} + m_{\text{solid}} c_{\text{solid}}) (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) \quad (22.12)$$

$$= (V_w \rho_w c_{pw} + V_{\text{solid}} \rho_{\text{solid}} c_{\text{solid}}) (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) \quad [\text{J}]$$

حيث: m الكتلة

c_{pw} و c_{solid} السعة الحرارية النوعية للمادة الصلبة (دليلها solid) وللماء (الدليل w)
 V الحجم
 ρ الكثافة النوعية.

من أجل خزان حراري هجين (مختلط) يتألف من وسيط حرارة محسوسة (مثل الماء) ووسيط حرارة كامنة (مثل البارافين) فإن سعة التخزين الإجمالية تحسب كما يلي:

$$Q_{\text{total}} = \{m_s c_s (t_{\text{max}} - t_{\text{min}}) + m_l [c_{\text{solid}} (t_{\text{solid}} - t_{\text{melt}}) + h_{\text{melt}} + c_{\text{fl}} (t_{\text{max}} - t_{\text{melt}})]\} \quad [\text{J}] \quad (23.12)$$

حيث: m_s كتلة وسيط تخزين الحرارة المحسوسة

m_1 كتلة وسيط تخزين الحرارة الكامنة
 c_s السعة الحرارية النوعية لوسيط تخزين الحرارة المحسوسة
 c_{solid} و c_{fl} السعة الحرارية النوعية لوسيط تخزين الحرارة الكامنة في الحالة الصلبة (Solid) أو السائلة (fl)
 t_{min} و t_{max} درجتا الحرارة الأعظمية والأصغرية للخرزان الحراري
 t_{melt} درجة حرارة انصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة
 h_{melt} انتالبي انصهار وسيط تخزين الحرارة الكامنة.

الخرزانات الحرارية عند درجات الحرارة المتوسطة والعالية
 في مجال درجات الحرارة المتوسطة (حتى 500 °C) تستخدم الطاقة الشمسية مثلاً لإنتاج الحرارة للعمليات الحرارية الصناعية أو للتبريد أو لتوليد الكهرباء. وبسبب الضياعات الحرارية الكبيرة فإنه من المناسب لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية استخدام الخرزانات الحرارية القصيرة الأمد (فترة تخزينها 0.5 إلى 3 ساعات).

الجدول 4.12: القيم المميزة لوسط التخزين في مجال درجات الحرارة للمتوسطة.

ρ [kg/m ³]	C [J/kgK]	λ [W/mK]	h_{melt} [kJ/kg]	t_{melt} [°C]	وسيط التخزين
وسائط تخزين ذات الحرارة الكامنة (أملاح صائفة وحلالت)					
2130	2030	1.33	530	252	LiNO ₃
1860	1750	0.43	150	337	KNO ₃
2160	950	4	520	800	NaCl
1880	1800	0.61	171	294	(93.6%/66.4) NaNO ₃ /NaCl
1890	1210	0.48	150	320	(94.5%/64.5) KNO ₃ /KCl
1887	1000	1	140	342	(88/4.7%/67.3) KNO ₃ /KBr/KCl
وسائط التخزين الصلبة					
7850/7800	550/500	35/45	—	—	فولاذ/ حديد صلب
2400	1000	2.1	—	—	خرسانة (بيتون)

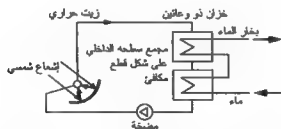
ملاحظات:

1. t_{melt} درجة حرارة الانصهار، h_{melt} إنتالبي الانصهار
2. القيم المميزة للمواد (λ التوصيل الحراري، C السعة الحرارية النوعية، ρ الكتلة النوعية) منسوبة للحالة الصلبة.

عند درجة الحرارة حوالي 200°C يمكن استخدام خزانات الماء الساخن والبخار، وفوق درجة الحرارة هذه وحتى 400°C تستخدم في الوقت الحاضر وبشكل رئيسي خزانات الزيت. وتُستعمل في الخزانات ذات الضغط الجوي الزيوت المعدنية كوسيط تخزين، وذلك عند درجات حرارة أدنى من 300°C ، أما من أجل درجات الحرارة التي تزيد عن 400°C فتستخدم خزانات تتعرض للضغط العالي وتُشغّل بزيوت حراري غالي الثمن. يمكن لمجال درجات الحرارة بين 300 و 500°C استخدام خزانات حرارة محسوسة تعمل بأملاح مصهورة ومعادن سائلة (الصوديوم).
يُبين الجدول (4.12) القيم المميزة لوسائط التخزين لمجال درجات الحرارة المتوسطة.
تتأثر أساليب التخزين المستخدمة في المحطات الشمسية بشكل كبير بالناقل الحراري وضغطه ومستوى درجة الحرارة.

يُستخدم كوناقل حرارية في المحطات الشمسية الهواء أو الملح (HITEC) أو الزيت الحراري أو الماء/البخار.

فمثلاً يتم تخزين الحرارة مباشرة عن طريق وسيط نقل حرارة المجمع أي الزيت الحراري في حوض تخزين يتألف من وعائين أحدهما حار والآخر بارد (الشكل 6.12).
تبلغ درجة الحرارة الأعظمية المسموح بها 400°C .



الشكل 6.12 : الخزان ذو الحوضين (الوعائين) الذي يعمل عند درجات الحرارة المتوسطة.

إلى جانب الخزانات الحرارية ذات الحرارة المحسوسة ذات درجات الحرارة المتوسطة فإن خزانات الحرارة الكامنة تكسب أهمية أيضاً.

تقوم وسائط التخزين بالحرارة الكامنة بتخزين الحرارة المحسوسة بالإضافة إلى إنتالبي الانصهار. من أجل درجات الحرارة التي تقع بين 280 و 500°C فمن المناسب استخدام نترات المعادن القلوية

* المقصود بهذه المعادن: ليثيوم، صوديوم، بوتاسيوم، روبليوم، سيزيوم، فرانسيم، (الترجم).

أو نترات المعادن القلوية الأرضية^{٢٢}.

في عملية تخزين الحرارة الكامنة تكون استطاعة التعبئة (الشحن) والتفريغ محدودة بسبب الانتقال السئ للحرارة بين ناقل الحرارة ووسيط التخزين.

في مجال درجات الحرارة المتوسطة تُستخدم كذلك هيدرات المعادن (مثل MgH_2) كوسائط تخزين في الخزانات الحرارية — الكيميائية.

وفي مجال درجات الحرارة 500 حتى $1300^\circ C$ يمكن استعمال خزانات الحرارة المحسوسة ذات المواد السيراميكية مثل MgO ، SiO_2 ، Al_2O_3 . في الخزانات الحرارية التي تستخدم مادتين مع ملح كوسيط حرارة كامنة في مسام مادة البناء السيراميكية يمكن الحصول على كثافة طاقة مرتفعة، ولذلك فإن الكمية اللازمة من وسيط التخزين أقل بكثير منها في خزانات الحرارة المحسوسة.

مثال 3.12

يُطلب تحديد مواصفات خزان الحرارة الكامنة لمنشأة شمسية ذات درجة حرارة وسطية. سعة التخزين اللازمة 2 MWh، ودرجة الحرارة القصوى للعمل هي $260^\circ C$.

ما هو وسيط الحرارة الكامنة الأنسب للاستخدام؟

وما هي كتلة هذا الوسيط؟

يُشار إلى أنه لا يجوز أن يتجاوز فرق درجات الحرارة Δt لوسيط الحرارة الكامنة في دورة تخزين القيمة 20 K.

الحل

1. يتم اختيار أنسب وسيط حرارة كامنة من الجدول (4.12) وهو $LiNO_3$ الذي تبلغ درجة حرارة

انصهاره $t_{melt} = 252^\circ C$ ، انتالبي انصهاره $h_{melt} = 530 \text{ kJ/kg}$ ، السعة الحرارية النوعية $c = 2030$

J/kg K .

2. نحسب كثافة الطاقة المنسوبة للكتلة من أجل خزان الحرارة الكامنة كما يلي:

$$Q = c \Delta t + h_{melt}$$

$$= 2.03 \text{ kJ/kg K} \times 20 \text{ K} + 530 \text{ kJ/kg} = 570.6 \text{ kJ/kg}$$

^{٢٢} المقصود بهذه المعادن: معادن المجموعة الثانية في الجدول الدوري أي: بيريليوم، مغنيزيوم، كالسيوم، سترانشيوم، باريوم، راديوم (المترجم).

3. الكتلة اللازمة لوسيط الحرارة الكامنة:

$$M = Q/q$$

$$- 2 \text{ MWh} \times 3600 \text{ s/h} \times 1000 \text{ kJ/MJ} / 570.6 \text{ kJ/kg} = 12618.3 \text{ kg}$$

تخزين الطاقة الحراري — الكيميائي

يمكن تخزين الطاقة بسبب التفاعلات الكيميائية العكوسة ذات انتالبي التفاعل ذي القيمة الكبيرة، وتستخدم الطاقة في هذه العملية لإجراء تفاعل كيميائي ماص للحرارة (endothermic) وتُخزن نواتج الاحتراق. وفي التفاعل المُطلق للحرارة (exothermic) تستعاد الحرارة ثانية.

محاسن مخزونات الطاقة الحرارية — الكيميائية هي:

— ارتفاع كثافة الطاقة المنسوبة إلى الحجم.

— عدم حدوث ضياعات طاقة أثناء تخزين نواتج التفاعل.

تعتبر أنواع التفاعلات العكوسة التالية مناسبة من أجل التخزين الحراري — الكيميائي للطاقة:

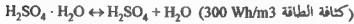
— نزع الهيدرات من هيدرات الأملاح والحموض (مثلاً $\text{H}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Na}_2\text{S} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

— اختزال ماعاء للمعادن (مثل Ca(OH)_2).

— التفكك الحراري للغازات (مثلاً $\text{SO}_3 \leftrightarrow \text{SO}_2 + 1/2 \text{O}_2$).

— التفكك (تحلل) الأملاح (مثلاً CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$).

وهذه بعض الأمثلة لهذه التفاعلات:



تخزين الطاقة باستخدام أنبوب حرارة كيميائي

يمكن استخدام أنبوب حرارة كيميائي على سبيل المثال لتخزين الطاقة الشمسية عن طريق دورة عمل حرارية — كيميائية. يستخدم الإشعاع الشمسي المركز في مفاعل ذي درجة حرارة عالية لتهديب الغاز الطبيعي بواسطة وسيط كيميائي (catalytic reforming)، وهكذا يجري التفاعل الماص للحرارة بين الميثان وبخار الماء عند درجة حرارة 960°C :



يستخدم خليط أول أكسيد الكربون CO والهيدروجين H₂ كحامل للطاقة. يتم في منطقة الاستهلاك في مفاعل ذي وسيط كيميائي تشكل للميتان من CO وH₂ وتنطلق بذلك كمية من الحرارة. يستخدم الروديوم أو النيكل كوسائط محفزة (حفازات) في كلا المفاعلين (المهذب وصانع الميتان).

4.12 خزانات البخار

خزان البخار الفائض عند انخفاض الحمل على العنفة البخارية يتم تخزين الحرارة في خزان للماء الساخن، وتتألف دورة التخزين من عملية الملء والتخزين والتفريغ.

يتم الملء (الشحن) بتمرير البخار عبر فوهات بخار إلى داخل حوض الخزان وبذلك ترتفع قيمة الضغط فيه من p_1 إلى p_2 وعند ملامسة الماء المباشرة فإن البخار يتكاثف، ويؤدي تلقي حرارة التكاثف إلى رفع درجة الحرارة من t_1 إلى t_2 الاتتالي من h_1 إلى h_2 . تعطي معادلة موازنة الطاقة عند شحن الخزان كمية البخار المضافة:

$$(25.12) \quad m_v = m_{w1} (h_1 - h_2) / (h_v - h_2) \quad [\text{kg}]$$

حيث: m_{w1} كتلة الماء في حوض التخزين عند بدء عملية التخزين وعند p_1 و t_1 [kg]

h_1 و h_2 الاتتالي النوعي للماء عند بدء الشحن وعند النهاية [kJ/kg]

h_v الاتتالي النوعي للبخار المضاف [kJ/kg].

عندما يكون الخزان مملوفاً توجد فيه الكتلة $m_{w2} = m_{w1} + m_v$ من الماء الذي يغلي عند p_2 و t_2 . وعند تفريغ الخزان يسحب البخار من حجراته مما يؤدي إلى تناقص الضغط في الخزان من p_2 إلى $p = p_2 - \Delta p$ ويحدث أثناء التناقص الكظيم للضغط تبخر لجزء من الماء ربما تصبح درجة الحرارة في الخزان مساوية لدرجة حرارة الإشباع عند الضغط p . تنتج كتلة البخار المشيع بواسطة إجراء موازنة للطاقة أثناء عملية التفريغ.

كمثال عن مواصفات منشأة ذات خزان للبخار الفائض في محطة نووية استطاعتها الكهربائية MW 400 نسوق المعطيات التالية: تتألف المنشأة من 4 خزانات حجم كل منها 580 m³ و 8 خزانات تجميع حجم كل منها 180 m³. ضغط الشحن ودرجة حرارته كالتالي 20 bar و 212 °C

أو 48 bar و 260 °C . كما يكفي محتوى الطاقة لمنشأة التخزين لتشغيل محطة توليد الكهرباء لمدة ساعتين.

13 استخدام الطاقة بشكل اقتصادي وفعال

1.13 المحافظة على مصادر الطاقة والبيئة

يعطي الجدول (1.13) استهلاك الطاقة بحسب مجموعات المستهلكين ومجالات الاستخدام وذلك في ألمانيا الغربية (سابقاً).

يمكن تحقيق وفر في الطاقة الأولية وذلك عن طريق استخدام فعال لها، ويمكن الحد من الهدر عن طريق:

— تجنب الاستهلاك غير الضروري

— تخفيض الاستهلاك التوعوي للطاقة

— تحسين المردود

— تخفيض ضياعات الطاقة

— الاستفادة من الطاقة المسترجعة.

الجدول 1.13: استهلاك الطاقة بحسب فئة المستهلك ومجال الاستخدام في ألمانيا الغربية سابقاً (عام 1991).

المستهلك	الاستهلاك بـ 10 ¹⁵ J	منها بالـ % قوة محرك تسخين + تكييف	عمليات حرارية صناعية	إتارة
الإجمالي	7.83	37.8	32.2 + 5.2	1.9
الصناعة	2.27	19.4	10.1 + 0.7	1.6
الاستهلاك المنزلي	2.12	6.0	76.6 + 12.2	1.5
للرصالات	2.13	99.7	0.1	—
البقي	1.31	20.6	50.5 + 10.1	5.8

يؤدي الاستخدام الاقتصادي والعقلاني للطاقة إلى تقليل انبعاث المواد الضارة والغازات المؤثرة على المناخ والبيئة. (وبشكل خاص CO₂).

2.13 تحسين العزل الحراري في الأبنية والأنابيب

العزل الحراري في الأبنية والبيوت ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة

يتراوح الاستهلاك الحراري لتدفئة المنازل في ألمانيا بين 220 و 270 kWh لكل m^2 من مساحة السكن، أما استهلاك الطاقة لتدفئة المنازل فهو يرتبط بعوامل كثيرة مثل تكتل وعدم تبعر البناء وخواص العزل وقدرة السطوح الخارجية للبناء على تخزين الحرارة ودرجة الاستفادة من حمل التدفئة والتهوية واستخدام طاقة الشمس والوسط المحيط، بالإضافة إلى سلوك المستهلك نفسه. يكون استخدام الطاقة إيجابياً ومفضلاً إذا اجتمعت المواصفات الفيزيائية المثلى لبناء من حيث اختيار أبعاد الغلاف الخارجي له، مع التصميم الداخلي الجيد بما يتماشى مع الاستفادة الفعالة والبسيطة من الجمل الشمسية. كلما قلّت النسبة بين مساحة غلاف البناء وحجمه كلما كان البناء أكثر ترابطاً (compact). عند تساوي السطح المفيد فإن الضياعات الحرارية في البناء الأكثر ترابطاً تكون أقل. وبالتالي فإن عامل نفوذ الحرارة من الأبنية ذات المساكن المتعددة أقل منه في البيوت المنفردة (مسكن لأسرة واحدة).

يمكن الإقلال من استهلاك الحرارة لتدفئة منزل ما عن طريق بعض الإجراءات مثل الوفر في استهلاك الطاقة والاستفادة السلبية (passive) الممكنة من الطاقة الشمسية. تدعو النظم والقواعد المتعلقة بالمحافظة على الحرارة في ألمانيا إلى الحد الشديد من استهلاك الحرارة السنوي لتدفئة المنازل وإلى الإقلال ما أمكن من القيم المسموح بها لعامل نفوذ الحرارة k لأجزاء الأبنية المختلفة. والقيم المطلوب اتباعها قريبة من تلك النافذة لما يسمى "البيوت ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة" والتي تتطلب جزءاً صغيراً فقط من الطاقة اللازمة للتدفئة التي تستهلكها البيوت التقليدية. في البيوت ذات الاستهلاك المنخفض للطاقة والتي تبين على مبدأ العزل الحراري الأمثل، والوفر الأعظمي بالطاقة عن طريق التهوية للتحكم بها واستعادة الحرارة والاستفادة من الطاقة الشمسية، يتراوح استهلاك الحرارة للتدفئة سنوياً بين 30 و 70 kWh لكل m^2 من مساحة السكن.

تبلغ التكاليف الإضافية لبناء هذا النوع من البيوت 3 إلى 8 % من تكاليف البيوت المألوفة. يتطلب هذا النوع من البيوت العزل الحراري الجيد للمحدران الخارجية للبناء بحيث تصبح كثيفة للهواء والرياح، كذلك يجب تجنب الجسور الحرارية (المواقع ذات المقاومة الحرارية المنخفضة)، والتحكم بالتهوية والاستفادة السلبية (passive) من الطاقة الشمسية. تُخفّض في هذه البيوت إلى

الحد الأدنى ضياعات انتقال الحرارة وذلك عن طريق العزل الأمثل للغلاف الخارجي، وإغلاق الجسور الحرارية في أجزاء البناء (منع تهرب الحرارة). كذلك يتم تقليل الضياعات الحرارية مع التهوية عن طريق غلاف يمتص تسرب الرياح، بالإضافة إلى ضبط جملة التهوية والتحكم بما بحيث لا يتجاوز عامل تجديد (تغيير) الهواء $1/h - 0.5$. كذلك يجب أن يصمم هذا المزل من الناحية المعمارية بحيث يُستخدم الإشعاع الشمسي المار عبر النوافذ في الشتاء للتدفئة بشكل أمثل، وأن يُحجب في الصيف تفادياً للحرارة الزائدة.

إذا أمكن تأمين التيار الكهربائي والحرارة بشكل كامل عن طريق طاقة الشمس والمحيط عندها يتم الحصول على ما يسمى "البيت ذي الطاقة للعلوم". وشروط ذلك، عزل حراري أمثل واستخدام مصادر الطاقة الداخلية، واسترجاع الحرارة واستخدام منشآت فوتوفولطية وشمسية لتأمين الماء الساخن والتدفئة (عن طريق خزانات حرارة فصلية مصممة بالشكل الأمثل).

تتألف حرارة التدفئة لبناء ما من الحرارة اللازمة للتهوية والحرارة المنتقلة عبر جدران البناء:

$$(1.13) \quad Q_H = Q_T + Q_V = (k_m A_{Build} + z c_p V) (t_{in} - t_{ext}) \quad [W]$$

حيث: k_m عامل نفوذ الحرارة الوسطي للبناء $[W/m^2K]$

A_{Build} مساحة الغلاف الخارجي للبناء $[m^2]$

V حجم البناء $[m^3]$

z عامل تجديد الهواء $[1/h]$ (بين 0.5 أو 1 في الساعة)

c_p السعة الحرارية النوعية للهواء $[Wh/m^3K]$ (قيمتها $0.34 Wh/m^3K$)

t_{ext} و t_{in} درجة الحرارة الداخلية والخارجية $[^\circ C]$.

يُحسب عامل نفوذ الحرارة الوسطي k_m من قيم k لأجزاء البناء المختلفة (الجدار الخارجي، النافذة، السقف) وسطوحها كما يلي:

$$(2.13) \quad K_m = \sum (k A) / A_{Build}$$

يتم إنقاص استهلاك الحرارة بالنقل من سطح البناء عن طريق تحسين عملية العزل الحراري. ولهذا يُستخدم الزجاج المملوء بغاز خامل الذي تبلغ قيمة k له 1.4 إلى $0.7 Wh/m^2K$ ، أما السطوح غير الشفافة من البناء فيتم عزلها حرارياً بالشكل الأمثل. أما سماكة العازل لأجزاء البناء واللازمة

لإنقاص عامل نفوذ الحرارة عن القيمة الأصلية k (بدون عازل) إلى قيمة مرغوبة (أكثر محافظة على الحرارة)، فنحدد بمقارنة المقاومات الحرارية كما ستورد فيما يلي.
تُحسب المقاومة الحرارية الإجمالية (بالـ m^2W/K) كما يلي:

أ - بدون عازل

$$(3.13) \quad R = 1/k = 1/\alpha_i + \sum (\delta/\lambda) + 1/\alpha_{ext}$$

ب - مع عازل (تحمين المحافظة على الحرارة)

$$(4.13) \quad R_{isol} = 1/k_{isol} = 1/\alpha_{in} + \sum (\delta/\lambda) + (\delta/\lambda)_{isol} + 1/\alpha_{ext}$$

حيث: k ، k_{isol} عامل نفوذ الحرارة بدون عازل أو معه $[W/m^2K]$

α_{ext} ، α_{in} عامل انتقال الحرارة في داخل الغرفة وخارجها $[W/m^2K]$

(δ/λ) مجموع المقاومات الحرارية لطبقات البناء (δ) سماكة الطبقة $[m]$

λ عامل توصيل الحرارة لمادة البناء $[W/mK]$

δ_{isol} سماكة العازل $[m]$

λ_{isol} عامل توصيل الحرارة لمادة العزل $[W/mK]$.

تصبح السماكة اللازمة للعازل كما يلي:

$$(5.13) \quad \delta_{isol} = \lambda_{isol} (R_{isol} - R) = \lambda_{isol} (1/k_{isol} - 1/k) \quad [m]$$

يمكن التقليل من الحرارة اللازمة للتهوية (تجديد الهواء) بتخفيض عامل تغير الهواء z ومن أجل ذلك تلزم تهوية مضبوطة مع تسخين أولي للهواء البارد من طريق الحرارة الضائعة مع الهواء المطروح التي يتم استرجاعها في مبادل حراري خاص.

يتناسب الوفرة في الطاقة بواسطة العزل الأفضل طردياً مع الفرق بين قيمة k للبناء العادي وقيمة k للبناء المعزول جيداً.

يمكن باستخدام درجات الحرارة القياسية في الداخل والخارج وبلاستعانة بالمعادلة 1.13 حساب الاستهلاك الحراري القياسي Q_N (Norm) بالواط وكذلك عدد ساعات الاستخدام الكلي في العام كما يلي:

$$(6.13) \quad Q_{H,V} = Q_N b \quad [Wh/a]$$

مثال 1.13

ما هي السماكة المطلوبة للعازل حتى يمكن تخفيض الضياعات الحرارية من جدار خارجي بمقدار 80 %. القيمة الأولية لـ k (قبل العزل) للجدار الخارجي $1.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ، وعامل التوصيل الحراري للعازل 0.04 W/mK .

الحل

نحسب تيار الضياع الحراري من الجدار الخارجي بدون ومع عزل كما يلي:

$$Q = k A \Delta t, Q_{\text{isol}} = k_{\text{isol}} A \Delta t$$

$$Q_{\text{isol}} = 0.2 Q$$

وبالتالي ينتج عامل نفوذ الحرارة مع عزل كما يلي:

$$K_{\text{isol}} = 0.2 k = 0.2 \times 1.4 = 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$$

أما سماكة العازل:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{isol}} &= \lambda_{\text{isol}} (1/k_{\text{isol}} - 1/k) \\ &= 0.04 (1/0.28 - 1/1.4) = 0.114 \text{ m} \end{aligned}$$

عزل الحرارة في الأنابيب

سندرس فيما يلي حالتين: الضياعات الحرارية في أنبوب غير معزول وآخر معزول. تنشأ الضياعات الحرارية بسبب فرق درجات الحرارة بين المائع الساخن (ماء ساخن، بخار، هواء) ضمن الأنابيب والهواء الخارجي. يتحدد تيار الضياعات الحرارية بمعرفة فرق درجات الحرارة بين المائع والهواء الخارجي ومساحة سطح الأنابيب والمقاومة الحرارية الإجمالية. تبين المعادلة التالية كيفية حساب كثافة تيار الضياعات الحرارية بالنسبة إلى 1 m من طول الأنابيب:

$$(7.13) \quad q_l = Q / L \quad [\text{W/m}]$$

حيث: Q تيار الضياعات الحرارية $[\text{W}]$

L طول الأنابيب $[\text{m}]$.

أما تيار الضياعات الحرارية فهو يحسب كما يلي:

$$\begin{aligned} Q - L (t_F - t_{\text{air}}) / [1 / \pi d_i \alpha_{\text{in}} + (1 / 2 \pi \lambda) \ln (d_{\text{ext}} / d_{\text{in}}) + 1 / \pi d_{\text{ext}} \alpha_{\text{ext}}] \\ (8.13) \quad = L (t_F - t_{\text{air}}) / (R_{\text{in}} + R_w + R_{\text{ext}}) \quad [\text{W}] \end{aligned}$$

حيث: t_f و t_{air} درجة حرارة المائع والهواء الخارجي [°C]

d_{ext} , d_{in} القطر الداخلي والخارجي للأنبوب [m]

α_{ext} , α_{in} عامل انتقال الحرارة للمائع إلى السطح الداخلي للأنبوب أو من السطح

الخارجي للأنبوب إلى الهواء [W/m²K]

R_{ext} , R_{in} , R_w المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب، ولانتقال الحرارة عند السطح الداخلي

أو الخارجي للأنابيب [mK/W].

تُحسب المقاوَمات الحرارية بالنسبة لـ 1 m من طول الأنبوب (بالـ mK/W) كما يلي:

- لجدار الأنبوب

$$(9.13) \quad R_w = (1/2 \pi \lambda) \ln (d_{ext} / d_{in})$$

- من أجل انتقال الحرارة من المائع الساخن (مثلاً الماء الساخن) إلى السطح الداخلي لجدار الأنبوب:

$$(10.13) \quad R_{in} = 1 / \pi d_{in} \alpha_{in}$$

- لانتقال الحرارة من السطح الخارجي لجدار الأنبوب إلى الهواء البارد:

$$(11.13) \quad R_{ext} = 1 / \pi d_{ext} \alpha_{ext}$$

تكون في العادة قيم R_w و R_{ext} أصغر بكثير من R_{in} بحيث يمكن إهمالها (R_w , R_{ext})، وبالتالي يمكن اعتبار t_{ext} أي درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب مساوية تقريباً لـ t_f .

ولحساب تيار الضياعات الحرارية من الأنابيب غير المعزولة يمكن بشكل تقريبي كتابة:

$$(12.13) \quad Q \approx \alpha_{ext} \pi d_{ext} L (t_f - t_{air}) \quad [W]$$

يتألف عامل انتقال الحرارة الإجمالي من مقدارين:

$$(13.13) \quad \alpha_{ext} = \alpha_c + \alpha_{R_{rod}} \quad [W/m^2K]$$

حيث: α_c عامل انتقال الحرارة بالحمل والإشعاع وذلك من السطح الخارجي للأنبوب إلى الوسط المحيط [W/m²K].

من أجل الحمل الحر للهواء:

$$(14.13) \quad \alpha_c = Nu \lambda / l = m Ra^n \lambda / l$$

حيث: Nu رقم نوسيل

λ عامل التوصيل الحراري للهواء

l الطول المميز (القطر للأنايب الأفقية، الطول للأنايب الشاقولية)

Ra رقم ريليه

m و n أرقام مرتبطة بـ Ra (انظر الجدول 2.1).

يُحسب تيار الحرارة المتقلة بالإشعاع كما يلي:

$$(15.13) \quad Q_{Rad} = A_{ext} \varepsilon C_o [(T_o / 100)^4 - (T_{air} / 100)^4] \quad [W]$$

حيث: $A_{ext} = \pi d_{ext} L$ السطح الخارجي للأنبوب (حوالي 0.9)

W/m^2K 5.67 = C_o عامل إشعاع الجسم الكامل السواد

T_o و T_{air} درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب وللجو.

وبطريقة تقريبية:

$$(16.13) \quad Q_{Rad} = 0.5 A_{ext} \varepsilon C_o (T_o + T_{air})^3 \quad [W]$$

أما عامل انتقال الحرارة بالإشعاع فيحسب كما يلي:

$$\alpha_{Rad} = Q_{Rad} / A_{ext} (T_o - T_{air})$$

$$(17.13) \quad = 0.5 A_{ext} \varepsilon C_o (T_o + T_{air})^3 (T_o - T_{air}) \quad [W/m^2K]$$

مثال 2.13

يُطلب حساب تيار الضياعات الحرارية لأنبوب ماء ساخن غير معزول قطره الخارجي $d_{ext} = 80 \text{ mm}$ وطوله $L = 20 \text{ m}$. درجة حرارة السطح الخارجي لهذا الأنبوب $t_F = 200^\circ \text{C}$ ، درجة حرارة الهواء $t_{air} = 20^\circ \text{C}$ عامل انتقال الحرارة الإجمالي $\alpha_{ext} = 18 \text{ W/m}^2\text{K}$ وذلك من الأنبوب إلى الهواء.

الحل

يحسب تيار الضياع الحراري كما يلي:

$$Q = \pi \alpha_{ext} d_{ext} L (t_F - t_{air})$$

$$= \pi 18 \text{ W/m}^2\text{K} \times 0.08 \text{ m} \times 20 \text{ m} (200 - 20) \text{K} = 162860 \text{ W}$$

تكون المقاومة الحرارية في الأنايب المعزولة أعظمية في مادة العزل، ودرجة حرارة السطح

الخارجي للأنبوب أصغر بكثير من درجة حرارة المائع t_F .

ولحساب كثافة التيار الحراري بالنسبة لـ 1 m من طول الأنايب المعزولة نكتب:

$$q_1 = Q/L = (t_F - t_{air}) / [1 / \pi d_{in} \alpha_{in} + (1/2 \pi \lambda_w) \ln(d_{ext}/d_{in}) + 1 / \pi d_{isol} \alpha_{ext}] \quad (18.13)$$

حيث: $d_{ext} = d_{isol} + 2\delta_{isol}$ قطر الأنبوب المعزول [m]
 δ_{isol} سماكة العازل
 λ_w و λ_{isol} عامل التوصيل الحراري لجدار الأنبوب أو للعازل [W/mK].
وبشكل بديل يمكننا كتابة:

$$q_1 = (t_F - t_{air}) / (R_{in} + R_w + R_{isol} + R_{ext}) \quad (19.13)$$

حيث: R_{in} و R_w المقاومة الحرارية لجدار الأنبوب أو للعازل (بالنسبة لـ 1 m من طول الأنبوب) [mk / W]
 R_{ext} و R_{in} المقاومة الحرارية لعملية انتقال الحرارة عند الجانب الداخلي أو الخارجي للأنبوب (بالنسبة لـ 1 m من طول الأنبوب) [mk/W].
إذا أهملت R_{in} و R_w بالنسبة لـ R_{isol} و R_{ext} تصبح:

$$q_1 \approx (t_F - t_{air}) / (R_{isol} + R_{ext}) = (t_O - t_{air}) / R_{ext} \quad [W/m] \quad (20.13)$$

ولحساب درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب:

$$t_O = t_{air} + (t_F - t_{air}) R_{ext} / (R_{isol} + R_{ext})$$

$$= t_{air} + (t_F - t_{air}) / [1 + (d_{isol} \alpha_{ext} / 2 \lambda_{isol}) \ln(d_{isol}/d_{ext})] \quad [^\circ C] \quad (21.13)$$

ولحساب تيار الضياعات الحرارية:

$$Q = \pi \alpha_{ext} d_{isol} L (t_O - t_{air}) \quad [W] \quad (22.13)$$

مثال 3.13

تخفّض الضياعات الحرارية من الأنبوب الوارد في المثال 2.13 عن طريق عازل سماكته $\delta_{isol} = 50 \text{ mm}$ وعامل توصيله للحرارة $\lambda_{isol} = 0.04 \text{ W/mK}$
ما هو تيار الضياعات الحرارية للأنبوب المعزول؟

الحل

القطر الخارجي للأنبوب المعزول:

$$d_{\text{isol}} = d_{\text{ext}} + 2 \delta_{\text{isol}}$$

$$= 0.08 \text{ m} + 2 \times 0.05 \text{ m} = 0.18 \text{ m}$$

وتحسب درجة حرارة السطح الخارجي للأنبوب المعزول وفقاً للمعادلة (12.13) كما يلي:

$$t_0 = 20^\circ\text{C} + (200 - 20)\text{K} / [1 + (0.18 \text{ m} \times 18 \text{ W/m}^2\text{K} / 20.04 \text{ W/mK})$$

$$\ln (0.18 \text{ m} / 0.08 \text{ m})] = 25.3^\circ\text{C}$$

أما تيار حرارة الضياعات:

$$Q = \pi \alpha_{\text{ext}} d_{\text{isol}} L (t_0 - t_{\text{amb}})$$

$$= \pi 18 \text{ W/m}^2\text{K} \times 0.18 \text{ m} \times 20 \text{ m} (25.3 - 20)\text{K} = 539.5 \text{ W}$$

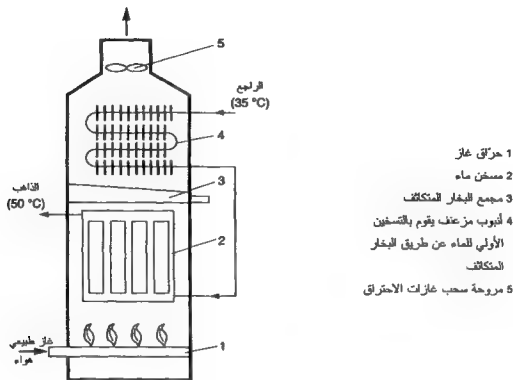
3.13 أجهزة التدفئة الاقتصادية

تُحصل في مراحل التدفئة القديمة ضياعات طاقة كبيرة. فيمكن مثلاً أن تصل الضياعات مع غازات الاحتراق إلى 12 وحتى 15 %، ومع الإشعاع والتحتضيرات 10 إلى 23 %، بحيث يصل المردود إلى 62 وحتى 76 % فقط. وغالباً ما تكون المراحل المستخدمة أكثر من المطلوب وغير متناسبة بالأصل مع الحرارة المطلوبة، وبسبب ذلك يزداد الاستهلاك الحراري السنوي بمقدور 30 %. كذلك لا يتم في كثير من الأحيان تنظيم توزيع الحرارة بشكل صحيح. بالإضافة إلى ذلك يساهم العزل الخاطئ أو عدم وجوده أصلاً إلى زيادة الضياعات الحرارية. ويصل مردود الاستفادة السنوي في منشآت التدفئة القديمة حتى حوالي 60 % أما في المنشآت المُحدثة فيصل إلى حوالي 89 %.

تغطي تقانة التدفئة الحديثة الحاجات الحرارية للغرف وللعمليات الحرارية الصناعية بشكل اقتصادي وملائم للبيئة. كما يُمكن استخدام هندسة التحكم من الموازنة بين توليد الحرارة والحاجة الفعلية لها.

تُنظَّم في مراحل التدفئة ذات درجات الحرارة المنخفضة درجة حرارة دخول الماء إلى مراحل التسخين، بحيث تتواءم مع الاستهلاك الحراري الذي يتعلق بدرجة حرارة الهواء الخارجي. يمكن أن تستخدم في مراحل حرق الغاز القيمة الحرارية العليا للغاز التي تزيد 10 إلى 12 % عن القيمة الحرارية الدنيا LCV، ولذلك يكون مردود مراحل الغاز مرتفعاً ويصل إلى 105 حتى 110 % (منسوباً إلى القيمة الحرارية الدنيا للوقود). يبين الشكل (1.13) طريقة عمل مرجل الغاز، حيث يتم تبريد غازات الاحتراق عند درجة حرارة منخفضة للماء العائد إلى 50 °C، وهكذا يتكاتف

بخار الماء الموجود في غازات الاحتراق ويُستفاد من حرارة تكاثف بخار الماء في تسخين الماء تسخيناً أولياً. يجب أن يكون المسخن الأولي للماء مصنوعاً من مادة مقاومة للصدأ، وتتمتع مراحل الغاز الحديثة ذات درجات الحرارة المنخفضة بمردود عالٍ.



الشكل 1.13 : مخطط يبين مبدأ عمل مراحل الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للغاز.

فمثلاً تبلغ الضياعات مع غازات الاحتراق 7 إلى 9 % بينما تبلغ ضياعات الإشعاع والتحضير 1 إلى 2 %، وبالتالي يبلغ المردود 89 إلى 92 %.

عناصر منشأة التدفئة التي تساهم في وفر الطاقة وحماية البيئة هي:

- الحزان الحراري
- المبادل الحراري الذي يستفيد من حرارة غازات الاحتراق وحرارة تكاثفها (أي من القيمة الحرارية العليا للوقود)
- الحراق الذي يطلق قدرأ ضئيلاً من المواد الضارة (حرقات حديثة)
- أجهزة التحكم التي توأمت بين عمل منشأة التدفئة وحالة الجو.

يؤدي استخدام هذا النوع من المراحل إلى استخدام أفضل للوقود وإلى وفر في الطاقة بمقدار 20 إلى 25 %.

عند توزيع الحرارة تجري المحاولة قدر الإمكان إلى تخفيض درجة حرارة الماء المغادر للمرجل. بواسطة الموازنة المثلّي بين عناصر المرجل يمكن تحقيق التوافق الجيد بين الحرارة المتولدة والاستهلاك الفعلي للحرارة. لتدفئة الغرف الكبيرة في المنشآت الصناعية يمكن استخدام التدفئة بالهواء الساخن، وهذه الطريقة مناسبة خاصة عندما يكون هناك تغير كبير لدرجات الحرارة أو للغرف التي تستخدم لأوقات قصيرة. وفي هذه الحالة فإنه من المناسب استخدام عدة مسخنات هواء صغيرة بدلاً من جهاز كبير.

في المثال التالي (4.13) سيُعرض حساب الوفر السنوي في تكاليف الطاقة لمرجل حرق الوقود الغازي مع الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للغاز.

مثال 4.13

يُستعاض في جملة تدفئة عن مرجل تدفئة تقليدي درجة الاستفادة منه $\eta_{\text{conv}} = 80\%$ لمرجل يحرق الغاز درجة الاستفادة منه $\eta_{\text{G,SG}} = 104\%$ (منسوباً إلى القيمة الحرارية الدنيا للوقود). ما هو الوفر السنوي في استهلاك الطاقة؟ عندما يكون الاستهلاك المعياري للحرارة $Q_N = 50 \text{ kW}$ ، عدد ساعات الاستخدام في السنة $b = 1640 \text{ h/a}$ وكلفة الغاز الطبيعي $C = 0.7 \text{ DM/m}^3$.

القيمة الحرارية الدنيا للوقود الغازي 36 MJ/m^3 .

الحل

1. الاستهلاك السنوي للحرارة من أجل التدفئة:

$$\begin{aligned} Q_H &= Q_N b \\ &= 50 \text{ kW} \times 1640 \text{ h/a} = 82000 \text{ kWh/a} \end{aligned}$$

2. الاستهلاك السنوي للوقود:

— عندما تستخدم مجموعة التدفئة مرجلاً تقليدياً:

$$\begin{aligned} B_{\text{conv}} &= Q_H / \text{LCV } \eta_{\text{conv}} \\ &= 82000 \text{ kWh/a} \times 3600 \text{ s/h} / (36000 \text{ kJ/m}^3 \times 0.8) = 102500 \text{ m}^3/\text{a} \end{aligned}$$

- عند استخدام مرجل الاستفادة من القيمة الحرارية العليا للغاز:

$$B_{G,SG} = Q_H / LCV \eta_{G,SG}$$

$$= 82000 \text{ kWh/a} \times 3600 \text{ s/h} / (36000 \text{ kJ/m}^3 \times 1.04) = 78846 \text{ m}^3/\text{a}$$

3. الوفرة السنوي في الطاقة عند استخدام المرجل الجديد:

$$\Delta B = (B_{\text{conv}} - B_{G,SG}) C$$

$$= (102500 \text{ m}^3/\text{a} - 78846 \text{ m}^3/\text{a}) 0.7 \text{ DM/m}^3 = 16557.8 \text{ DM/a}$$

4.13 استرجاع الحرارة والمضخات الحرارية

يجري استرجاع الحرارة من هواء الغرف المطروح أو هواء العمليات الصناعية أو من الماء المطروح في مختلف المنشآت.

تتعلق درجة الحرارة الضائعة بالعمليّة والمنشأة (انظر الجدول 2.13).

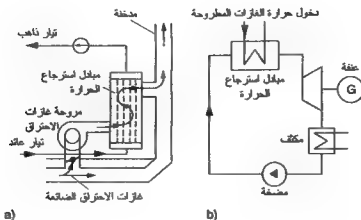
الجدول 2.13: درجات الحرارة النمطية للهواء الضائع، للغازات الضائعة، للماء المطروح

درجة الحرارة	الوسيط	العمليّة/المنشأة
26 – 16	الهواء	تجهيزات هواء الغرفة
60 – 20	الهواء	عمليات التبريد
60 – 20	ماء	منشآت التبريد وعمليات أخرى
550 – 150	غازات الاحتراق	منشآت محركات الاحتراق وهندسة العمليات

لاسترجاع الحرارة تستخدم المبادلات الحرارية الاسترجاعية الشكل (2.13)، ولتوليد الكهرباء تستخدم عملية (Organic rankine Cycle) ORC أي دورة رانكين العضوية ذات الوسيط العضوي (مثل R 11 و R 12 ...) ويمكن الحصول عن طريق عمليات ORC عندما تكون درجات حرارة الغازات الضائعة 200 إلى 500 °C على مرود يصل إلى 20%.

لتحويل الحرارة الضائعة إلى حرارة مفيدة أيضاً تستخدم المضخات الحرارية. تنقل المضخة الحرارية الحرارة من وسيط منبع حراري ذي درجة حرارة منخفضة إلى وسيط عمل عند مستوى حراري أعلى، وهي تتألف من مبادل حراري لسحب الحرارة من المصدر الحراري (حرارة الوسيط الخارجي أو حرارة ضائعة) وآلة التبريد ومبادل حراري لانتقال الحرارة إلى وسيط عمل العمليّة

المفيدة، مثلاً إلى الماء الساخن. تتألف آلة التبريد بالانضغاط من أربعة عناصر: مبخر وضغط ومكثف وصمام خنق الشكل (3.13). ويستخدم كوسيط تبريد مائع ذو درجة غليان منخفضة وغير حار على FCKW كالأمونيك. تستخدم لتشغيل الضاغط محركات كهربائية أو محركات احتراق داخلي.

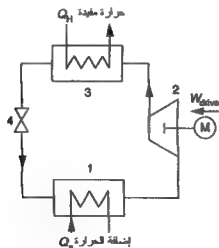


الشكل 2.13 : استرجاع حرارة الغازات (a) لتوليد حرارة مفيدة (b) لتوليد التيار الكهربائي.

رقم الاستطاعة أو رقم التسخين لمضخة حرارية هو النسبة بين حرارة التسخين وطاقة التحريك الميكانيكية.

(23.13)

$$\phi = Q_H / W_{drive}$$



- 1 مبخر
- 2 ضاغط مع محرك تشغيل
- 3 مكثف
- 4 صمام خنق (تمدد)

الشكل 3.13 : المضخة الحرارية بالانضغاط.

تتراوح قيمة ϕ للمضخات الحرارية الكهربائية بين 2.0 و 4.3. وللمضخات الحرارية ذات محرك الاحتراق الداخلي يصل رقم التسخين السنوي 1.1 إلى 2.4. تتراوح الحدود العليا لدرجة حرارة تكاثف وسائط التبريد المختلفة بين 55 و 120 °C. يرتبط فرق درجات الحرارة المرتفع بين المصدر الحراري والماء الساخن بالاستفادة الكبيرة من الطاقة مما يؤدي إلى قيم منخفضة نسبياً لـ ϕ . أما المضخة الحرارية الامتصاصية فتتألف من: مبخر وكميص ومولد ومكثف ومضخة وصمامي خنق (تمدد) (الشكل 4.13).

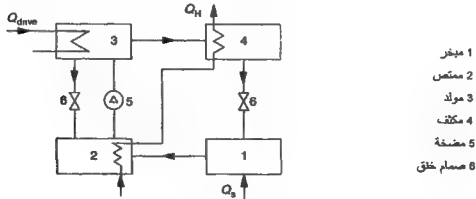
تعمل المضخات الحرارية الامتصاصية بزوج من وسائط العمل (بروميد الليثيوم — الماء للمبخرات التي تزيد حرارتها عن 4 °C أو الامونياك — الماء للمبخرات التي تقل درجة حرارتها عن الصفر 0 °C).

نسبة الحرارة لمضخة حرارية امتصاصية هي النسبة بين حرارة التسخين وحرارة التحريك (التشغيل):

$$(24.13) \quad \zeta = Q_{Ht}/Q_{drive}$$

وبناءً على فرق درجات الحرارة بين المولد والمبخر فإن قيم ζ التي يمكن الحصول عليها هي 1.1 و 1.3.

يمكن تشغيل منشآت التدفئة ذات المضخات الحرارية إما منفردة أو بالمشاركة مع منشأة أخرى.



الشكل 4.13 : المضخة الحرارية الامتصاصية.

عند التشغيل بمضخات حرارية منفردة فإنه يتم تغطية الحمولة الحرارية بدون تسخين إضافي، أما في المنشآت التي تعمل بالمشاركة فإن المضخة الحرارية تعمل على التوازي أو كبديل مع منشأة تدفئة

تقليدية، وعند التشغيل بالمشاركة يجب أن يصمم التسخين الإضافي دوماً من أجل 100 % للحرارة الأعظمية اللازمة للتسخين. يمكن للمنشآت التي تعمل بالمشاركة وعلى التوازي أن تغطي الاحتياجات الحرارية بشكل أكبر وذلك بمساعدة المضخة الحرارية.

تبلغ تكاليف الاستثمار 500 إلى 700 DM لكل kW من الاستطاعة المفيدة، ومن أجل تشغيل اقتصادي يلزم 5000 إلى 6000 ساعة استخدام في العام.

تستخدم المضخات الحرارية للتدفئة في الغرف ولتوليد الحرارة للعمليات المختلفة. أما مصادر الحرارة للمنشآت المضخات الحرارية فهي: الهواء الخارجي، المياه الجوفية (8 إلى 12 °C)، التراب (الأرض)، المياه السطحية (2 إلى 15 °C)، الإشعاع الشمسي، الهواء المطروح، المياه المطروحة، ماء التبريد.

وفر الطاقة في المنشأة ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة والبرودة

إن ميزة هذه المنشأة هي عملها طوال العام، وبالتالي يرتفع معدل استثمارها واقتصاديتها. في المثال (5.13) ستعرض مقارنة بين المنشأة ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة والبرودة وبين منشأة تبريد تقليدية ذات آلة تبريد بالانضغاط.

مثال 5.13

يطلب تحديد درجة الاستفادة لمحطة ذات توليد مشترك للكهرباء وللحرارة وللبرودة بآلة تبريد امتصاصية، ومحطة أخرى تولد البرودة، بواسطة آلة تبريد بالانضغاط وتولد الكهرباء في منشأة بخارية.

معلوم للمحطة ذات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة والبرودة، القيم الساعية التالية (بالـ

(kWh):

الاستهلاك للطاقة الأولية 2560، الطاقة المفيدة (الطاقة الكهربائية 770، الحرارة المفيدة 405 والبرودة المفيدة 1000)، ضياعات الطاقة 358.

أما كميات الطاقة الساعية (بالـ kWh) في منشأة المقارنة فهي:

في محطة توليد الكهرباء: استهلاك الطاقة الأولية 3170، الطاقة المفيدة (الكهربائية) 770،

ضياعات الطاقة 2155.

وفي آلة التبريد بالانضغاط: التبريد المفيد 1000، الطاقة الكهربائية لتشغيل الضاغط 245.

الحل

تُحسب درجة الاستفادة التي هي النسبة بين الطاقة المفيدة (تيار كهربائي، حرارة، برودة) والطاقة المستخدمة كما يلي:

— لحظة التوليد المشترك للكهرباء والبرودة والحرارة:

$$\eta_1 = E_e / E_{\text{prim}} = 2175 / 2560 = 0.85$$

— ولتنبؤ المقارنة ذات توليد البرودة في آلة التبريد بالانضغاط وتوليد الكهرباء في المحطة البخارية.

$$\eta_2 = Q_e + E_e / E_{\text{prim}} = 770 + 1000 / 3170 = 0.56$$

5.13 توليد الكهرباء في آلات تمدد الغاز

العملية

يتراوح ضغط الغاز الطبيعي في شبكات توزيع الغاز بين 40 و 70 bar، يُخفّض هذا الضغط إلى 4 حتى 8 bar في محطة تنظيم الضغط بواسطة الخنق.

! الخنق هو عملية تمدد كظيم غير عكوس لو بسيط عن طريق جريانه عبر صمام تمدد.

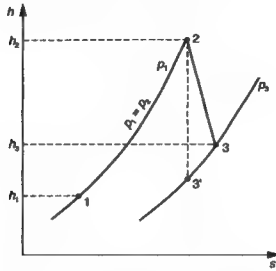
وهكذا ينخفض الضغط ($p_2 < p_1$) مع بقاء إنتالبي وسيط العمل ثابتاً أي $h_1 = h_2$. كذلك تبقى درجة الحرارة في الغازات المثالية ثابتة $t_1 = t_2$. وجراء أثر تومسون — جول (Thomson-Joule effect) فإن الغاز الطبيعي يتردّد عند إجراء عملية الخنق أي أن $t_2 < t_1$ عندما تكون درجة حرارته قبل صمام التمدد أصغر من درجة حرارة العكس (الانقلاب) T_{inv} . فمثلاً تبلغ درجة حرارة الانقلاب لبخار الماء 4369 K ولذلك تنخفض درجة حرارته عند الخنق.

عند إجراء عملية الخنق للغاز الطبيعي فإنه يؤخذ عند الحساب انخفاض في درجة الحرارة قدره 0.4 إلى 0.5 K لكل 1 bar في تغير الضغط Δp . ولتجنب تبريد مبالغ فيه وغير مرغوب عند قيمة مرتفعة لـ Δp فإنه يتم عادة تسخين الغاز.

إن هبوط ضغط الغاز الطبيعي الذي يحدث في جملة التغذية وعند الخنق يمكن استخدامه في توليد التيار الكهربائي.

لتوليد الكهرباء يُسخّن الغاز الطبيعي في البدء تسخيناً أولياً ثم يترك ليتمدد في آلة تمدد الغاز (عنفة أو آلة تمدد مكبسية أو لولبية).

من الضروري إجراء التسخين الأولي للغاز لأن درجة حرارته عند التمدد تنخفض.



الشكل 5.13 : التسخين الأولي للغاز بثبوت الضغط (2-1) وتمدد الغاز غير العكوس (3-2) على مخطط h-s.

يبين الشكل (5.13) العملية المولفة من تسخين أولي للغاز عند ثبوت الضغط وتمدد الغاز غير العكوس وذلك على مخطط h-s.

ينتج استهلاك الحرارة اللازم لتسخين الغاز تسخيناً أولياً (2-1) في الشكل (5.13) من المعادلة:

$$Q_s = m \Delta h_{\text{preh}} = m c_p (T_2 - T_1) \quad [\text{kJ/s}] \quad (25.13)$$

حيث: m التدفق الكتلي للغاز الطبيعي [kg/s]

Δh_{preh} ارتفاع الانتالبي [kJ/kg]

c_p السعة الحرارية النوعية الوسطية للغاز الطبيعي [kJ/kg]

T_1 و T_2 درجة حرارة الغاز قبل التسخين الأولي وبعده.

في التمدد النظري (الإيزونتروبي) (2 - 3') فإن العمل النوعي المفيد يحسب كما يلي:

$$w_i = h_2 - h'_3 = c_p (T_2 - T'_3)$$

$$= k / (k - 1) R T_2 [1 - (p_3 / p_2)^{(k-1)/k}] \quad [\text{kJ/kg}] \quad (26.13)$$

حيث: $k = 1.32$ لأس الإيزونتروبي (CH_4 ليس الإيزونتروبي)

R ثابت الغاز (0.519 kJ/kgK) للميثان، الدليلان 2 و 3 هما حالة الغاز قبل التمدد وبعده.

ولحساب الاستطاعة النظرية لآلة تمدد الغاز:

$$(27.13) \quad P_{theor} = m w_i \quad [kW]$$

حيث: m التدفق الكتلي للغاز $[kg/s]$.

بسبب عدم العكسية تنشأ ضياعات طاقة يتم تضمينها في المردود الداخلي η_i للآلة.

أما الاستطاعة الفعلية $P_{\#}$ الممكن نقلها من آلة التمدد فهي أقل من الاستطاعة النظرية وهي:

$$(28.13) \quad P_{\#} = \eta_i P_{theor} = \eta_i m w_i \quad [kW]$$

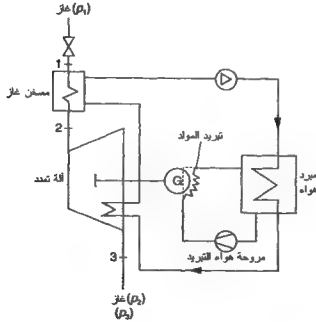
أما درجة الحرارة النهائية الفعلية للغاز فهي تحسب كما يلي:

$$(29.13) \quad T_3 = T_2 \{1 - [1 - (p_3 / p_2)^{(k-1)/k}] \eta_i\} \quad [K]$$

يتم كسب الاستهلاك الزائد (الإضافي) للتسخين الأولي عند التمدد مقارنة بالاختناق بشكل كامل كعمل.

ومردود العملية المثالية يحسب كما يلي:

$$(30.13) \quad \eta_{theor} = P_{theor} / Q_s$$



الشكل 6.13 : مخطط سير العمليات في منشأة آلة التمدد المولقة من مسخن الغاز، محرك غازي مع آلة تمدد، مولد ومبرد هواء.

المردود الإجمالي الفعلي (يبلغ حوالي 80 % عند استرجاع الحرارة) بحسب كما يلي:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{theor}} \eta_i \eta_m \eta_G \quad (31.13)$$

حيث: η_i المردود الداخلي لآلة التمدد

η_m المردود الميكانيكي

η_G مردود المولد الكهربائي.

يبين الشكل (6.13) مخطط سير العمليات في منشأة آلة التمدد، المولدة من: آلة تمدد (محرك غازي) ومولد. تُنقل الحرارة التي تمر على آلة التمدد والمولد ثم تضيع إلى ماء التسخين في مورد الهواء ومبرد المحرك الغازي، وتُستخدم في التسخين الأولي للغاز في مسخن للغاز. وكمثالٍ ستعرض مواصفات منشأة تمدد الغاز الطبيعي المستخدمة لتزويد مدينة Lübeck (الألمانية) بالغاز. القيم الأولية والنهائية التي تميز الغاز الطبيعي هي على سبيل المثال: 45 حتى 50 bar / 9 إلى 16 و 40 حتى 45 bar / 4 حتى 7.5 bar... إلخ حتى 4 bar / 17.5 حتى 8 bar. تعلق الاستطاعة الكهربائية P_e بمبوط الضغط وتدفق الغاز V : عند $V = 45000 \text{ m}^3/\text{h}$ فإن $P_e = 1.5 \text{ MW}$ وعند $7000 \text{ m}^3/\text{h}$ تكون 0.365 MW. ويتم التشغيل الفعال بمعدل 4000 ساعة حمولة كاملة في العام. كذلك يمكن استخدام المعفات الغازية في عملية تمدد الغاز الطبيعي.

14 الهيدروجين، خلايا الوقود، مولدات MHD

مفاعل الاندماج النووي

1.14 إنتاج الهيدروجين واستخدامه كطاقة

طرائق الإنتاج السائدة

يتم في الوقت الحاضر توليد الهيدروجين من الغاز الطبيعي والنفط (نفثا) والفحم. يتولد عن طريق التحويل بواسطة البخار (عند الدرجة 900 °C) لأنواع الوقود الطيارة مثل الغاز الطبيعي، والنفثا (naphta) أو عن طريق الأكسدة الجزئية للفحم (تحويله إلى غاز بإضافة الأوكسجين وبخار الماء عند درجة الحرارة 1400 °C) يتولد مزيج غازات حارٍ على الهيدروجين، وينتج من الغاز الطبيعي والنفثا غازٌ تركيبه كما يلي: حوالي 68 % H₂، 10 % CO، 10 % CH₄، 10 % CO₂ و 2 إلى 3 % N₂. يتضمن غاز الكربون (الفحم) 30 إلى 40 % H₂ و 50 إلى 55 % CO و 1 إلى 3 % CH₄ و 3 إلى 12 % CO₂ و 1 إلى 2 % N₂. عن طريق تحويل ثنائي المراحل مُحفَّز وعند درجة حرارة 300 إلى 500 °C أو عند 200 °C يجري تخليص الغاز الحام من CO. وفي عملية غسيل ثانية لاحقة يُفصل CO₂ وينتج بذلك غاز الهيدروجين (الشكل 1.14).

إذا استخدم الغاز الطبيعي أو النفط كوقود فإن العملية توصف كما يلي.

تحويل الفحم الهيدروجينية للوقود بالبخار:

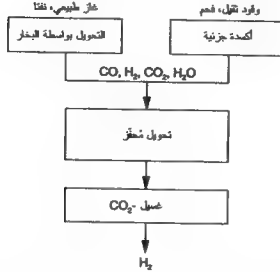
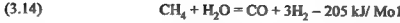


تحويل CO بواسطة البخار:



* المفصود بذلك مزيج بترولي درجة غليانه بين 95 و 150 °C (من نواتج الصناعة البترو كيميائية) — المترجم.

وللميتان تنطبق معادلات التحفيز التالية:



الشكل 1.14 : توليد الهيدروجين بواسطة التحويل بالبخار للغاز الطبيعي أو للنفثا أو بواسطة تحويل الفحم إلى غاز.

يعادل المحتوى الحراري لغاز الهيدروجين H_2 الناتج 75 حتى 80 % من المحتوى الحراري للغاز الطبيعي و 55 إلى 60 % من المحتوى الحراري للفحم. تختلف تكاليف إنتاج الهيدروجين وفقاً لنوع الوقود ولطريقة الإنتاج. من أجل 1 GJ من المحتوى الحراري تبلغ التكاليف عند استخدام الغاز الطبيعي 23 DM وعند استخدام الفحم البني 24 DM وللفحم الحجري 28 DM. ولإجراء مقارنة يُشار أن سعر الطاقة الكهربائية 20 DM/GJ.

طريقة التحليل الكهربائي

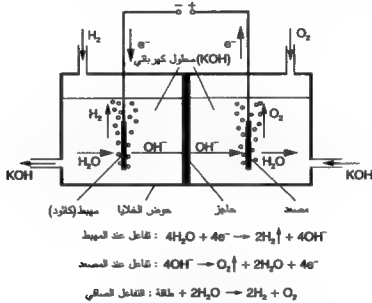
كطريقة بديلة لإنتاج الهيدروجين يمكن استخدام عملية تفكيك الماء بالتحليل الكهربائي والضوئي وبالتحليل الضوئي الحيوي.

عند تفكيك الماء بالتحليل الكهربائي ينتج الهيدروجين مباشرة:



ويبلغ إجمالي التفاعل ΔH حوالي 3.5 kWh لكل متر مكعب من الهيدروجين.

يبين الشكل (2.14) مبدأ خلية قلوية لتحليل الماء. يبلغ المردود الذي هو نسبة الاستهلاك النظري إلى الاستهلاك الفعلي حوالي 80 %. ويمكن رفعه إلى 90 % عن طريق إتقاص ضياعات الطاقة. وهناك الأنواع التالية من المحاليل الكهربية القلوية والغشائية (ذات الغشاء الرقيق) والبخارية ذات درجة الحرارة المرتفعة.



الشكل 2.14 : مبدأ خلية قلوية لتحليل الماء.

استخدام الهيدروجين لتوليد التيار الكهربائي وإنتاج الحرارة

تستخدم التقانات التالية من أجل الاستفادة من الهيدروجين كوقود:

□ لتوليد الحرارة:

— عن طريق الإحراق مع الأكسجين والهواء والحصول على درجات حرارة عالية.

— عن طريق الإحراق المحفز عند اللهب ذي درجة الحرارة المنخفضة (قليل الإصدار للمواد الضارة).

□ لتوليد الكهرباء:

— خلايا ذات درجات حرارة عالية وخلايا وقود غشائية (membrane).

— عن طريق ما يسمى التوليد المباشر للبخار.

□ لتوليد الكهرباء وإنتاج الحرارة معاً

- في محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة.
- في محطات الدارة المركبة ذات العنفات الغازية والبخارية (لتغطية حمولة الذروة).
- لتخزين الطاقة (في مآلات المعادن) وتخزين H_2 تحت الضغط.
- لتشغيل المركبات المحافظة على البيئة.

الاحتراق التقليدي والاحتراق المُحفَّز

على العكس من الغاز الطبيعي فإن للهيدروجين كوقود سرعة احتراق عالية ودرجة حرارة مرتفعة للهب. جرّاء سرعة الاحتراق العالية لبـ H_2 (237 cm/s مقابل 42 cm/s للغاز الطبيعي) فإن من الممكن حدوث عدم استقرار عند الاحتراق، كما أن درجات الحرارة المرتفعة للشعلة تؤدي إلى زيادة انبعاثات NO_x .

أما الاحتراق المُحفَّز للهيدروجين فهو يجري عند درجات حرارة أقل من 500 °C. ويمكن استخدام الحراقات المحفزة في مجالات الاستطاعة 50 kW للتدفئة والتبريد الانتصافي، وهي تتمتع بمردود عال وتعمل بدون إطلاق للمواد الضارة. بواسطة التشغيل المشترك للاحتراق للهب والاحتراق المُحفَّز عند درجات حرارة تتراوح بين 800 و1500 °C يمكن الوصول إلى استطاعات في مجال الـ MW مع تشكل قليل من NO_x .

محطات الدارة المركبة (ذات العنفات الغازية والبخارية) ومحطات التوليد المشترك للكهرباء

والحرارة

لتوليد الكهرباء والحرارة يمكن استخدام محطات الدارة المركبة (عنفات غازية + بخارية) وكذلك محطات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة ذات العنفات الغازية. تتمتع محطات الدارة المركبة (العنفات الغازية + البخارية) التي تحرق الوقود الغازي في الوقت الحاضر مقارنة بمحطات توليد الطاقة الأخرى في مجال الاستطاعة 500 MW بأقل تكاليف استثمار ويتراوح مردودها بين 50 و55 %. ويمكن الوصول إلى تشغيل بفعالية عالية دون تعديلات هندسية جوهرية باستخدام الهيدروجين لمحطات الدارة المركبة.

التوليد المباشر للبخار

تتم تغذية عنفة بخارية ذات ضغط عالٍ ودرجة عالية من مولد بخار H_2/O_2 ، وهذه العملية التي هي بديل لعملية البخار - الغاز (عنفة بخارية + عنفة غازية) تؤدي إلى ارتفاع المردود إلى ما يزيد على 50 %.

تُطوّر في الوقت الحاضر طريقة جديدة (HYDROSS) للتوليد المباشر للبخار من الماء والأوكسجين. مبدأ هذه الطريقة بسيط. تساق كميات متكافئة من H_2 و O_2 إلى حجرة احتراق ثم تحرق ويخفق الماء عبر فوهات متعددة إلى حجرة الاحتراق، وقبل ذلك يستخدم هذا الماء في تبريد جدار حجرة الاحتراق. تُبرّد غازات الاحتراق الساخنة من الدرجة 3000 °C إلى درجة حرارة البخار المطلوبة (500 حتى 1000 °C) ويتوقع أن يصل المردود إلى 50 % عند الحمولة الجزئية وإلى 100 % عند الحمولة الكاملة. يجب تنفيذ هذه الطريقة بحيث تكون بأسعار مناسبة، وتوضع في الوقت الحاضر خطط لمنشآت استطاعتها تتراوح بين 30 و 100 MW. ويمكن بزمن إقلاع صغير للغاية استخدام هذه المولدات كمعدات احتياط آنية في محطات توليد الطاقة.

في مجال تقانة الهيدروجين مازالت ثمة حاجة ماسة للتطوير.

2.14 خلايا الوقود

المبدأ

يتم تحويل الطاقة عند استخدام الوقود بالطريقة التقليدية كما يلي:

الطاقة الكيميائية للوقود ← حرارة (احتراق وانتقال الحرارة) ← طاقة ميكانيكية (آلة حرارية) ← طاقة كهربائية (مولد).

تُحوّل خلايا الوقود عن طريق عملية كهركيميائية الطاقة الكيميائية لوقود ما (مثل الهيدروجين أو الغاز الطبيعي) بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية، ويولد عندئذ تيار مستمر منخفض التوتر (الجهود).

تجري العملية في خلية الوقود كما يلي:

وقود + وسيط تأكسد ← نواتج أكسدة + عمل مفيد (طاقة كهربائية) + حرارة (6.14)

تتألف خلية الوقود H_2-O_2 من قطبين (مصعد ومهبط) ومحلول كهربائي. أما المعادلات التي تجري عند المهبط أو المصعد فهي من أجل خلية وقود تحوي الهيدروجين والأوكسجين كما يلي:



أو



وهكذا يمكن وصف التفاعل الإجمالي في خلية الوقود H_2-O_2 بالمعادلة التالية:



يمكن حساب القوة المحركة الكهربائية النظرية الأعظمية الناتجة عن خلية وقود باستخدام المعادلة التالية:

$$(10.14) \quad E_{\text{rev}} = -\Delta G / nF \quad [\text{V}]$$

حيث: ΔG تغير الطاقة الحرة في التفاعل [J/Mol]

n عدد الإلكترونات التي تشارك بالتفاعل والموجودة في كل مول من الوقود

(للهيدروجين $n = 2$)

F ثابت فاراداي (69487 C/Mol).

ولحساب تغير الطاقة الحرة في تفاعل كيميائي:

$$(11.14) \quad \Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad [\text{J / Mol}]$$

حيث: ΔH تغير الإنثالبي للتفاعل الإجمالي

$T \Delta S$ كمية الحرارة الممتصة أثناء عملية عكوسة عند ثبات درجة الحرارة.

يتعلق توتر (جهد) خلية الوقود بدرجة الحرارة والضغط، وتبلغ خلية الوقود $\text{H}_2\text{-O}_2$ عند 1 atm القيمة 1.23 V عند درجة الحرارة 25 °C وعند درجة الحرارة 200 °C تصبح 1.15 V فقط. ويزداد الضغط يرتفع التوتر (الجهد).

مردود خلية الوقود

يتم الوصول إلى أعظم مردود حراري η_{th} في خلية وقود عكوسة، وتنطبق العلاقة التالية:

$$(12.14) \quad \eta_{\text{th}} = \Delta G / \Delta H = 1 - T \Delta S / \Delta H$$

حيث: ΔG تغير الطاقة الحرة ($\Delta G = -237.14 \text{ kJ/Mol}$)

ΔH تغير الإنثالبي ($\Delta H = -285.83 \text{ kJ/Mol}$) عند تشكيل مول من الماء السائل من H_2 و

O_2 عند 1 atm و 25 °C.

ولحساب العمل الأعظمي لكل مول H_2 (متفاعل) أو لكل مول H_2O (ناتج):

$$(13.14) \quad W_{\text{max}} = \Delta G_R - \Delta G_{\text{H}_2\text{O}} \quad [\text{kJ/Mol}]$$

حيث: $\Delta G_R = 0 \text{ kJ / Mol}$ للمتفاعل.

القوة المحركة الكهربائية (electro motoric force) تحسب كما يلي:

$$(14.14) \quad EMF = E_{rev} = W_{max} / (n \cdot F) \quad [V]$$

بمراعاة عامل الجودة η_{Good} يمكن حساب المردود الإجمالي لخلاية الوقود كما يلي:

$$(15.14) \quad \eta_{total} = \eta_{th} \cdot \eta_{Good}$$

ولحساب الاستطاعة العكوسة الممكن كسيها:

$$(16.14) \quad P_{rev} = \Delta G \cdot m / M_{H_2} \quad [W]$$

حيث: m التدفق الكتلي للهيدروجين

M_{H_2} الكتلة المولية للهيدروجين (2.016 kg / kMol).

ولحساب الاستطاعة الكهربائية الفعلية لخلاية الوقود:

$$(17.14) \quad P_a = P_{rev} \cdot \eta_{total}$$

أما تيار الحرارة الذي يمكن تصريفه فيحسب كما يلي:

$$(18.14) \quad Q = P_{rev} - P_a \quad [W]$$

المخاسن والمساوى

لخلايا الوقود التي تستخدم الهيدروجين المزايا التالية:

— مردود أعلى (أكثر من 50%) عند الحمولة الكاملة وكذلك الجزئية.

— الماء هو ناتج التفاعل.

— قلة الضجيج.

— عدم إصدار مواد ضارة.

أما العيب المقابل لهذه المزايا فهو ارتفاع تكاليف الاستثمار وقصر العمر.

تعتبر خلايا الوقود مصدراً مثالياً للتيار الكهربائي ويصل مردودها إلى 40 %، ويمكن رفعه (المردود) إلى 80 % عن طريق استخدام كمية الحرارة الإضافية المنتشرة. يمكن تحقيق وفر في الطاقة قدره 40 إلى 60 % عن طريق استخدام تقانة خلايا الوقود، كما يمكن تخفيض انبعاثات NO_x في محطات توليد الطاقة ووسائل النقل من 50 إلى 90 % وتخفيض إطلاق CO_2 بمردود 50 % وذلك مقارنة بالطرق المألوفة.

مثال 1.14

يُطلب حساب توتر (جهد) العمل على فراغ (بدون حولة) والعمل الأعظمي والمردود الحراري لخلية وقود تستخدم H_2-O_2 عند درجة الحرارة $25^\circ C$ والضغط 1 atm (1.013 bar). الناتج H_2O يتواجد في الحالة السائلة.
ما هي قيمة الاستطاعة العكوسة الممكن كسبها وكذلك الاستطاعة الفعلية والمردود الإجمالي لخلية الوقود إذا كانت قيمة عامل الجودة 0.7 ؟
استهلاك H_2 هو 1.3 kg/h .

الحل

1. تغير الطاقة الحرة وانتالي تشكل H_2O (سائل) عند 1 bar و $25^\circ C$ هما كما يلي:

$$\Delta H_{H_2O} = -285.83 \text{ kJ / Mol}$$

$$\Delta G_{H_2O} = -237.14 \text{ kJ / Mol}$$

وبطريقة مشابهة فمن أجل المتفاعل:

$$\Delta H_R = \Delta G_R = 0 \text{ kJ / Mol}$$

2. العمل الأعظمي لكل مول H_2 (المتفاعل) أو لكل مول H_2O (ناتج):

$$\begin{aligned} W_{\max} &= \Delta G_R - \Delta G_{H_2O} \\ &= 0 \text{ kJ / Mol} - (-237.14 \text{ kJ/Mol}) \\ &= 237.14 \text{ kJ/Mol} \end{aligned}$$

3. التوتر (الجهد) الكهربائي النظري يمكن حسابه عن طريق القوة المحركة الكهربائية (EMF):

$$\begin{aligned} EMF &= E_{\text{rev}} = W_{\max} / (n \cdot F) \\ &= 237.14 \text{ kJ / Mol} / (2 \times 96487 \text{ As/Mol}) \\ &= 1.229 \text{ V} \end{aligned}$$

4. المردود الحراري لخلية الوقود:

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \Delta G_{H_2O} / \Delta H_{H_2O} \\ &= 237.14 \text{ kJ/Mol} / 285.83 \text{ kJ/Mol} = 0.83 \end{aligned}$$

5. المردود الإجمالي لخلية الوقود:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{total}} &= \eta_{th} \cdot \eta_{\text{Good}} \\ &= 0.83 \times 0.7 = 0.58 \end{aligned}$$

6. الاستطاعة العكوسة الممكن كسبها:

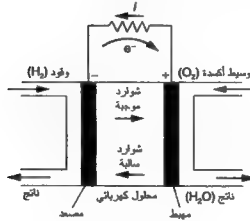
$$\begin{aligned} P_{rev} &= \Delta G \cdot m / M_{H_2O} \\ &= 237.14 \text{ kJ/Mol} \times 1.3 \text{ kg} / 3600 \text{ s} / 2.016 \text{ kg/Mol} \\ &= 42.48 \text{ W} \end{aligned}$$

7. الاستطاعة الكهربائية الفعلية لخلية الوقود:

$$\begin{aligned} P_a &= P_{rev} \cdot \eta_{total} \\ &= 42.48 \text{ W} \times 0.58 = 24.64 \text{ W} \end{aligned}$$

8. التيار الحراري الذي يتم تصريفه بحسب عن طريق الفرق بين الاستطاعة العكوسة والاستطاعة الفعلية المقدمة:

$$\begin{aligned} Q &= P_{rev} - P_a \\ &= 42.48 \text{ W} - 24.64 \text{ W} = 17.84 \text{ W} \end{aligned}$$



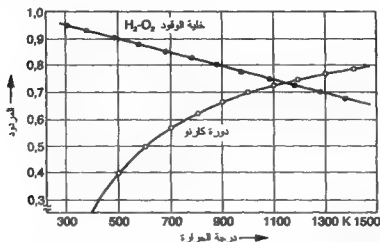
الشكل 3.14 : مبدأ خلايا الوقود.

1.2.14 أنواع خلايا الوقود

هناك الأنواع التالية من خلايا الوقود:

- الخلايا القلوية
- الخلايا الفوسفورية (حمض الفوسفور)
- خلايا الكربونات المنصهرة
- خلايا المحلول الكهربائي الصلب

يوضح الشكل (3.14) للبدأ العام لخلايا الوقود.
كما يبين الشكل (4.14) مقارنة بين المردود المثالي (النظري) لخلية الوقود H_2-O_2 وبين مردود دورة كارنو.



الشكل 4.14 : مردود خلية الوقود مقارنة بمردود دورة كارنو وعلاقة ذلك بدرجة الحرارة.
تتغير درجة الحرارة T_1 للمنبع الساخن في دورة كارنو بين 400 و 1400 K ، وتبلغ درجة حرارة الطرف ذي الدرجة المنخفضة $T_2 = 300$ K. درجة حرارة خلية الوقود مساوية لـ T_1 .
الجدول 1.14: مردود أهم نماذج خلايا الوقود.

نوع خلية الوقود	درجة الحرارة [°C]	المردود [%]
خلية وقود قلوية	90 – 60	60
خلية وقود حمض الفوسفور	220 – 160	42 – 37
خلية كربونات مصهورة	650 – 600	60 – 50
خلية أوكسيد السيراميك	1000 – 800	65 – 60

يبين الجدول (1.14) المردود العملي الممكن تحقيقه ودرجات حرارة التشغيل للنماذج المهمة لخلايا الوقود.

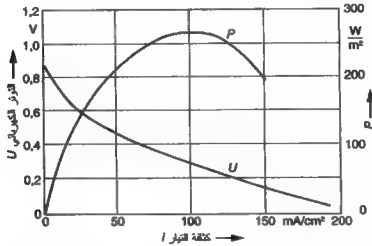
تحتاج خلايا الوقود موجاً (inverter) لتحويل التوتر (الجهود) المستمر المتغير المولد إلى توتر متناوب ثابت.

خلايا الوقود الخفيفة

تستخدم هذه الخلايا كمنبع خفيف للتيار وذلك في مجال رحلات الفضاء والمجال العسكري، وبسبب كلفتها العالية جداً فإنها لا تستخدم إلا في هذه المجالات. يولد التيار الكهربائي بمردود يزيد على 60 %، وبما أن درجة حرارة التشغيل منخفضة (80 °C) فإن استخدام الحرارة الضائعة في محاولة لرفع المردود أمر غير ممكن عملياً. تبلغ تكاليف الاستطاعة النوعية لهذه الخلايا في الوقت الحاضر 100 000 DM/kW تقريباً.

خلايا الوقود بمحضر الفوسفور

بمقارنتها بخلايا الوقود الخفيفة المتوفرة حالياً فإن خلايا حمض الفوسفور أرخص بشكل كبير، وتعمل هذه الخلايا عند درجة الحرارة 19 °C. وعند استخدامها لتوليد التيار فقط فإن مردودها يفوق 50 %، وباستخدام الحرارة الضائعة فإن من الممكن الوصول إلى مردود إجمالي يبلغ 80 %. تناسب خلايا حمض الفوسفور باستطاعة عدة كيلوواطات وحتى 10 MW بشكل خاص للاستخدام في المنازل الإفرادية (لأسرة واحدة) أو للمشافي أو للمعامل الصغيرة، كما يمكن استخدامها بشكل منفصل (لا مركزي) لتوليد الكهرباء في موقع معين.



الشكل 5.14 : التوتر (الجهد) الكهربائي والاستطاعة P (بالنسبة لـ m^2 مساحة) لخلية وقود وعلاقتها بكثافة التيار i [mA/cm^2].

توجد الآن منشآت استطاعتها في مجال الـ MW وهي قيد التجربة، ويتم في اليابان بناء عدة منشآت وصلت استطاعة الواحدة منها حتى 11 MW. ومن أجل المنشآت التي تقع استطاعتها

بمحدود 200 kW فإن التكاليف الاستثمارية لها تبلغ 4500 DM/kWe (عند التشغيل بالغاز الطبيعي)، وهي ما تزال أعلى بثلاثة أضعاف مما هو مطلوب لتكون اقتصادية، ويجب أن تُخفض في المستقبل لتصبح بمحدود 1300 DM/kW. كذلك يجب إطالة عمرها الحالي الذي يبلغ 15000 ساعة ليصبح 40 000 ساعة.

المنحنى المميز

يعطي المنحنى المميز لخلية وقود العلاقة بين التوتر الكهربائي U وكثافة التيار i . يبين الشكل (5.14) المنحنى المميز مع منحنى الاستطاعة (الاستطاعة بالواط منسوبة إلى المساحة m^2 وعلاقتها بكثافة التيار) لخلية وقود H_2-O_2 .

2.2.14 فكرة ومفهوم محطة الطاقة ذات خلايا الوقود

خلايا الوقود ذات درجة الحرارة المرتفعة

تم تطوير هذه الخلايا للاستخدام في محطات الطاقة، وهي تتميز برفقها بالبيئة وبمردودها العالي لتوليد الكهرباء، والذي يصل إلى 65 %. إلا أن التحويل المباشر للوقود إلى خلية وقود لا يزال محدوداً لأسباب اقتصادية. لذلك يجب استخدام الحرارة الضائعة وطاقة الارتباط الكيميائية لغازات الاحتراق من أجل رفع مردود محطة الطاقة. يفصل الهيدروجين من غازات الاحتراق بالطريقة الكهروكيميائية ويُعاد إلى خلية الوقود. تستخدم الحرارة الضائعة ذات درجة الحرارة المرتفعة لتوليد التيار الكهربائي واستخراج الحرارة.

وهناك نوعان رئيسيان من محطات الطاقة ذات خلايا الوقود:

— خلايا وقود الأكاسيد الصلبة (SOFC = Solid oxide fuel cell).

— خلايا وقود الكربونات المصهورة (MCFC = Molten carbonate fuel cell).

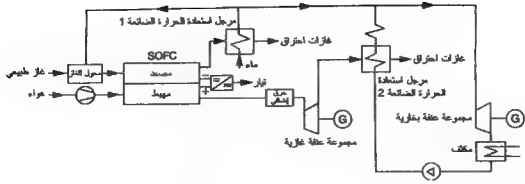
يبين الشكل (6.14) مبدأ وتركيب محطة طاقة ذات دائرة مركبة باستخدام خلايا وقود ذات درجات حرارة عالية أجزائها الرئيسية:

— منشأة تحويل الغاز الطبيعي.

— خلايا وقود SOFC مع استخدام الحرارة الضائعة.

— عنفة غازية مع المولد مع مرجل استرجاع (استعادة) الحرارة الضائعة.

— عنفة بخارية مع المولد.



الشكل 6.14 : مخطط تركيب محطة ذات دورة مركبة باستعمال خلايا وقود تعمل عند درجة حرارة عالية.

ولمعة فكرة أخرى لمحطة للدائرة المركبة تستخدم خلايا وقود MCFC، وهذه مناسبة للغاز المستخرج من الفحم لأنها قابلة للتشغيل ليس بالهيدروجين فقط وإنما بالميتان وأول أكسيد الكربون CO.

يتضمن مشروع محطة الطاقة ذات حجرة الاحتراق وخلايا الوقود MCFC ما يلي:

- جهاز تحويل الوقود إلى غاز بدرجات حرارة عالية
- مولد البخار — مورد الغاز الخام
- سحب الغبار من غاز الفحم وتحضيره
- عنفة غازية
- خلايا الوقود
- الاستفادة من الحرارة الضائعة من المصعد
- التسخين الأولي لغاز المصعد / المهبط
- الاستفادة من الحرارة الضائعة بقصد التسخين الأولي لمياه التغذية.
- إن مزايا مثل هذه المشاريع — الأفكار مقارنة بمحطات توليد الطاقة التقليدية هي الانبعاث القليل للمواد الضارة والمردود الأعظمي عند استخدامها لتوليد التيار الكهربائي (يقف 65%).
- ونظراً للتكاليف المرتفعة لتحضير غاز الفحم اللازم لتشغيل خلايا الوقود MCFC، فإن الانبعاثات تقل بشكل كبير.

لا تزال مشاريع محطات الطاقة التي تستخدم خلايا الوقود عند درجات الحرارة المرتفعة (MCFC و SOFC) في مرحلتها المبكرة، ويعين استخدامها التجاري التكاليف التي لا تزال عالية

جداً. إلا أن فعاليتها العالية وانخفاض إصدارها للمواد الضارة توران تكاليف 1500 دولار لكل 1 kW. إذا أنشئت مشاريع استطاعتها الإجمالية 200 إلى 300 MW في العام فإنه يمكن تحقيق هذه الأسعار. تخطط اليابان حتى عام 2000* لبدء تشغيل محطات طاقة ذات خلايا وقود استطاعتها GW 2 وتبدو محطات الطاقة ذات خلايا الوقود في المستقبل منافساً لمحطات الطاقة التقليدية.

3.14 تحويل الطاقة الحرارية — الكهربائي

تأثير Seebeck

في عام 1922 اكتشف Seebeck التأثير الحراري — الكهربائي (نسبته إليه بالكهرباء الحراري)، الذي يُمكن من التحويل المباشر للحرارة إلى تيار كهربائي. ينشأ في دورة مؤلفة من ناقلين A و B من معدنين مختلفين فرق كمون بين نقاط التماس ذات درجات الحرارة المختلفة. تدعى هذه الدارة الكهربائية بـ "العنصر الحراري" (thermo element).

يدعى الناقل الذي تجري فيه حوامل الشحنة السالبة النوع n (n - Type)، والناقل الثاني ذو حوامل الشحنة الموجبة، هو مسن النوع p (p - Type). تدعى نقاط التلامس بالوصلة الساخنة والوصلة الباردة. المعادن المستخدمة للنوع n هناك أسلاك النحاس وللنوع p أسلاك خليطة النيكل مع النحاس. أحد أكثر المواد فعالية للعناصر الحرارية هناك Bi_2Te_3 الذي يمكن استخدامه بالاستعانة بتقانة معينة كعازل موجب وسالب.

يتعلق ارتفاع فرق التوتر (الجهد) في عنصر حراري بزوج المواد الناقلة وبفرق درجات الحرارة بين نقاط التلامس. فعلى سبيل المثال يبلغ عامل Seebeck الذي نرسم إليه بـ α لعنصر حراري يتألف من النحاس وخليطة النحاس مع النيكل 0.04 mV/K. عندما تكون درجة الحرارة في عنصر حراري K 600 ينشأ توتر كهربائي قيمته 24 mV، وهذا يعني أنه للحصول على فرق توتر أعلى يجب وصل عدة عناصر حرارية على التوازي.

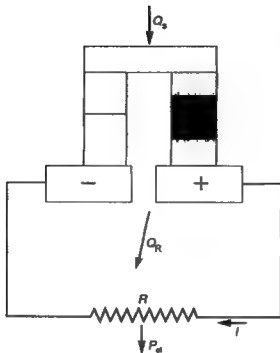
المولد الكهربائي الحراري

يمكن توليد تيار عن طريق مولد كهربائي حراري وجميع شمسي من الطاقة الشمسية. يبين الشكل (7.14) مبدأ عمل المولد الكهربائي الحراري. تبلغ الاستطاعة المفيدة لمولد كهربائي حراري:

* عند تأليف الكتاب في عام 1997 — المترجم

(19.14)

$$p_a = I^2 R \quad [\text{W}]$$

حيث: I التيار R المقاومة الخارجية للحمل (Ω).

الشكل 7.14 : مبدأ عمل المولد الحراري.

ولحساب التيار نكتب:

(20.14)

$$I = \alpha \Delta T / (R_i + R) \quad [\text{A}]$$

حيث: α عامل Seebeck [V/K] ΔT فرق درجات الحرارة بين الطرف الساخن والبارد [K] R_i المقاومة الداخلية [Ω].

لزيادة الاستطاعة المفيدة لمولد كهروحراري يستخدم الوصل التسلسلي والتفرعي، وهنا ميين

على الشكل (8.14) في a و b.

المردود

تحدد جودة (كفاءة) مولد كهروحراري عن طريق المردود الحراري η_{th} الذي ينتج كنسبة بين الاستطاعة الكهربائية P_a والاستطاعة الحرارية المستهلكة Q ، وبحسب المردود الحراري الأعظمي كما يلي:

$$(21.14) \quad \eta_{th,max} = (\Delta T / T_H) \sqrt{(1 + Z T_m) - 1} / \sqrt{(1 + Z T_m) + T_c / T_H}$$

حيث: T_c ، T_H درجة حرارة الطرف الساخن والبارد
 T_m درجة الحرارة الوسطية
 Z عامل الفعالية [K⁻¹].



الشكل 8.14 : مخططات الوصل لرفع الاستطاعة المفيدة (a) الوصل التسلسلي (b) الوصل التفرعي (على التوازي).
 لحساب Z :

$$(22.14) \quad Z = \alpha^2 / (\sqrt{\rho_N \lambda_N} + \sqrt{\rho_P \lambda_P})^2$$

حيث: ρ المقاومة النوعية [Ωm]
 λ عامل توصيل الحرارة [W/mK]
 N و P القطب السالب والقطب الموجب.
 يختلف المردود المقابل للاستطاعة الأعظمية $P_{el,max}$ عن $\eta_{th,max}$ ، حيث:

$$(23.14) \quad \eta_{th} = (\Delta T / \Delta T_H) / [2 + (4 / Z_{opt} T_H) - 0.5 \Delta T / T_H]$$

حيث: Z_{opt} عامل الكفاءة الأمثل.

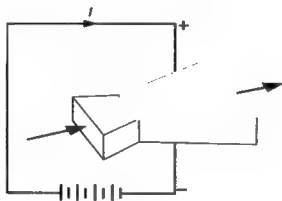
عندما يكون فرق درجات الحرارة بين الطرف الساخن والبارد 400 K (حيث البارد 373 K والساخن 773 K) فإن قيمة η_{th} الأعظمية تبلغ 11.4 %، بينما يصل مردود دورة كارنو $\eta_{th,c}$ إلى 52 % وبالتالي تبلغ حودة المحول الكهحراري 0.22.

4.14 مولد MHD (المولد الهيدروديناميكي المغناطيسي)

المبدأ

مبدأ مولد MHD (Magnetohydrodynamic generator) يقوم على ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسي. عندما يتحرك مائع ناقل للكهرباء في حقل مغناطيسي فإنه يتعرض في المائع (الوسيط) توتر (جهد) كهربائي. يتحرك في مولد MHD تيار من الغاز المتأين (بلاسما ذات درجة حرارة منخفضة مؤلفة من الإلكترونات وشوارد) ذي السرعة العالية في قناة أفقية عبر حقل مغناطيسي. تتراوح حرارة البلازما بين 2000 و 2500 °C. ولا يمكن الوصول إلى قابلية التوصيل الكهربائي اللازمة للبلازما إلا عن طريق إضافة كميات قليلة من المواد السهلة التأين (مثل السيزيوم، البوتاسيوم).

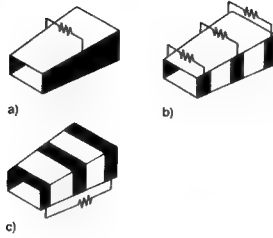
والشكل (9.14) يبين مبدأ مولد MHD.



الشكل 9.14 : مبدأ مولد MHD.

يتولد الحقل المغناطيسي بواسطة مغناطيس كهربائي متوضع حول القناة. تمر خطوط الحقل المغناطيسي بشكل عمودي على القناة، والقناة معزولة كهربائياً من الأعلى والأسفل. تقسم الجدران الجانبية للقناة إلى عدة أجزاء منفصلة عن بعضها البعض، حيث تتركب هناك أقطاب كهربائية (electrodes). بفعل الحث (التحريض) الكهربائي — المغناطيسي فإنه يتولد توتر كهربائي بالتحريض في الاتجاه المحوري والاتجاه الشاقولي، وتتوجه شوارد والإلكترونات البلازما إلى الأقطاب الموافقة، وهكذا تُحوّل الطاقة الحرارية مباشرة إلى طاقة كهربائية.

يبين الشكل (10.14) بشكل تخطيطي توضع الأقطاب الكهربائية في مولد MHD.



الشكل 10.14 : توضع الأقطاب لمحرك MHD، (a) التوضع المتصل (b) أقطاب قطاعية (c) مولد Hall.

في غاز متأين يجري بسرعة w عبر حقل مغناطيسي B (مخطوطه عمودية على اتجاه الجريان)، يتم التحكم باتجاه حوامل الشحنة (الالكترونات والشوارد الموجبة في البلازما) بحيث تكون عمودية على اتجاه الجريان وينشأ بالتالي حقل كهربائي متحرض.

إذا كان البعد بين الأقطاب s في مولد فاراداي عندئذ يحسب التيار الموافق للاستطاعة الأعظمية

كما يلي:

$$(24.14) \quad I_{\max} = w \cdot B \cdot A / Q \quad [A]$$

حيث: A مساحة سطح الأقطاب $[m^2]$

Q المقاومة النوعية للغاز المتأين $[\Omega m]$.

أما التوتر الكهربائي:

$$(25.14) \quad U_{\max} = w \cdot B \cdot s - I_{\max} \cdot \rho \cdot s / A \quad [V]$$

وتحسب الاستطاعة الأعظمية كما يلي:

$$(26.14) \quad P_{\max} = U_{\max} \cdot I_{\max} \quad [W]$$

(المردود (الكفاءة)

يُعرف مردود محول الطاقة MHD بأنه النسبة بين الاستطاعة الكهربائية المستحقة والاستطاعة

المقدمة واللازمة لدفع تيار الغاز المتأين عبر قناة MHD:

$$(27.14) \quad \eta_{MHD} = P_R / P_s$$

ويحسب مردود مولد MHD بالتالي كما يلي:

$$(28.14) \quad \eta_{\text{MHD}} = U_{\text{max}} / (w \cdot B)$$

أو بشكل تقريبي:

$$(29.14) \quad \eta_{\text{MHD}} = R_s / (R_s + R_i)$$

حيث: R_s و R_i المقاومة الخارجية والداخلية للغاز المتأين $[\Omega]$.

مثال 2.14

من أجل قناة MHD التي تُشغل كمولد فاراداي تبلغ المقاومة النوعية $\rho = 0.08 \Omega \cdot m$.
لتكن شدة الحقل المغناطيسي $B = 3.8 \text{ T}$ (3.8 تسلا)، ومساحة سطح الأقطاب الكهربائية
A تبلغ 1.2 m^2 . وعند عرض s للقناة يبلغ 0.9 m فإن سرعة البلازما $w = 950 \text{ m/s}$.
ما هي الاستطاعة المأخوذة ومردود التحويل؟

الحل

يحسب توتر العمل بلون حمل (على فراغ):

$$U_o = w \cdot B \cdot s \\ = 950 \text{ m/s} \times 3.8 \text{ m} = 3249 \text{ V}$$

ويحسب تيار القصر كما يلي:

$$I_k = A |w \cdot B| / \rho \\ = 1.2 \text{ m}^2 \times 950 \text{ m/s} \times 3.8 \text{ T} / 0.08 \Omega \cdot m = 54150 \text{ A}$$

وبالتالي فالجهد (التوتر):

$$U_{\text{max}} = w \cdot B \cdot s - I_{\text{max}} \rho \cdot s / A \\ = 950 \text{ m/s} \times 3.8 \text{ T} \times 0.9 \text{ m} - 27075 \text{ A} \times 0.08 \Omega \cdot m \times 0.9 / 1.2 \text{ m}^2 \\ = 1624.5 \text{ V}$$

والاستطاعة الأعظمية:

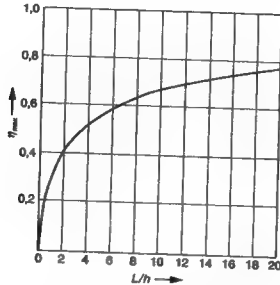
$$P_{\text{max}} = U_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} \\ = 1624.5 \text{ V} \times 27075 \text{ A} = 44 \text{ MW}$$

ومن ثم يُحسب مردود التحويل كما يلي:

$$\eta_{\text{MHD}} = U_{\text{max}} / (w \cdot B) \\ = 1624.5 \text{ V} / (950 \text{ m/s} \times 3.8 \text{ T}) = 0.45$$

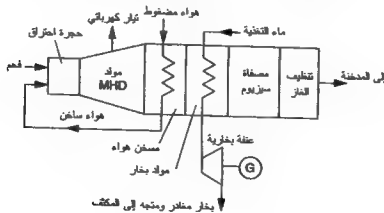
تبين التقديرات بأن التصميم الأمثل لمولد MHD يمكن أن يحقق مردود تحويل للطاقة قيمته الأعظمية تصل إلى 0.5.

يبين الشكل (11.14) المردود الأعظمي لمولد MHD وعلاقته بالنسبة L/h (طول القناة إلى عرضها).



الشكل 11.14 : المولد الأعظمي لمولد MHD وعلاقته بالنسبة L/h (طول القناة على عرضها).

يمكن رفع مردود استخدام الطاقة عن طريق استخدام منشأة مشتركة مؤلفة من مولد MHD مع عنفة غازية أو عنفة بخارية موصولة بعده، ويصل المردود الإجمالي إلى حوالي 60 %.



الشكل 12.14 : عنطط منشأة MHD تحرق الفحم مع عنفة بخارية تالية.

يبين الشكل (12.14) منشأة مشتركة بشكل تخطيطي تتألف من مولد MHD وعنفه بخارية تحرق الفحم.

يُحسب المردود الإجمالي للمنشأة المشتركة ذات مولد MHD كما يلي:

(30.14)

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{MHD}} + \eta_{\text{ST}} - \eta_{\text{MHD}} \cdot \eta_{\text{ST}}$$

مثال 3.14

ما هي قيمة المردود الإجمالي لمنشأة مشتركة تتألف من مولد MHD مردوده 0.4 ومنشأة بخارية ذات مردود قيمته 0.38 بدون إحراق إضافي للوقود.

الحل

يُحسب المردود الإجمالي من العلاقة:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{total}} &= \eta_{\text{MHD}} + \eta_{\text{ST}} - \eta_{\text{MHD}} \cdot \eta_{\text{ST}} \\ &= 0.4 + 0.38 - 0.4 \times 0.38 = 0.628 \end{aligned}$$

هناك أفكار لتركيبة منشآت MHD مشتركة، ولتحقيقها يجب حل بعض المشاكل الفنية (مثلاً مسخن الهواء ذو درجة الحرارة المرتفعة).

5.14 الاندماج الحراري النووي المضبوط

المبدأ

يجري داخل الشمس، حيث تسود درجة الحرارة حوالي 40 مليون كلفن، تفاعل اندماج نووي حراري (انصهار) لنوى خفيفة، ويرافق ذلك انطلاق حرارة الارتباط أي حرارة الاندماج وتحولها إلى طاقة حركية لنواتج التفاعل. عند اندماج 4 نوى من الهيدروجين إلى نواة هليوم فإن طاقة الاندماج تصل إلى 28.3 MeV (حيث $1 \text{ MeV} = 1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$). وتصل هذه الطاقة لكل 1 g من الهليوم إلى حوالي $6.7 \times 10^{11} \text{ J}$ وهذا يكافئ المحتوى الحراري لـ 23 طن من الفحم الحجري الذي قيمته الحرارية الدنيا 29.1 MJ/kg.

الطريقة

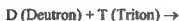
أهم الطرق هناك اندماج الديوتريوم والتريتيوم وكذلك الديوتريوم مع الديوتريوم. الديوتريوم والتريتيوم هما نظيران (isotope) للهيدروجين ^2H أو ^3H ، ويمكن استخدامها كوقود في تفاعلات

الاندماج. يتواجد الديوتريوم في الطبيعة على شكل ماء ثقيل فقط في جبال الهيمالايا بنسبة 1:16700.

الترشيوم عنصر مشع ويمكن إنتاجه صناعياً فقط وذلك من نظائر الليثيوم الثقيلة ^6Li .

تُعرف نوى الديوتريوم والترشيوم بالديوتريون D والتريتون T. يجب أن تملك نوى مزيج والتريتون الديوتريوم مع التريشيوم المتأينة أي للبلازما طاقة حركية كبيرة من أجل التغلب على قوة التدافع للذرات المشحونة إيجابياً عندما تكون الأبعاد بين الذرات 10^{-15} m ، والطاقة الحركية اللازمة لذلك يمكن الوصول إليها عند سرعة للذرات قدرها 1000 km في الثانية.

تجري في مزيج D-T في البلازما أي في مزيج الإلكترونات ونوى الذرات المشحونة إيجابياً (الشوارد) تفاعلات الاندماج التالية:



من أجل إشعال (ignition) وضمان استمرار حدوث الاندماج D-T الحراري النووي في البلازما والتحكم به فإنه تلزم طاقة حركية قدرها 10 keV (حيث درجة الالتهاب $1.1 \times 10^8 \text{ K}$) و $1 \text{ keV} = 1.14 \times 10^7 \text{ K}$. يمكن الحصول على درجة الحرارة فائقة الانخفاض هذه بواسطة إضافة شعاع من الجسيمات الحيادية أو التسخين عالي التردد. في اصطدام الاندماج يأتي 10^5 كولون Coulomb (حيث $1 \text{ A.s} = 1 \text{ coulomb}$). يجب أن تحاط البلازما بحيز للتفاعل وأن تبقى مادة جدران المفاعل بعيدة عن ذلك. وخلال مراحل بدء التسخين والتطويق تنشأ ضياعات للطاقة بفعل الإشعاع والتوصيل أو عدم نقاء البلازما بسبب امتزاجها بمادة الجدران.

لا يبقى في البلازما (أي ضمن حيز التفاعل) إلا طاقة جسيمات α (3.5 MeV) لنويات ^4He لأن النيوترونات السريعة تتسرب (14.1 MeV).

وللحصول على توازن الطاقة الإيجابي يجب أن تحصل تفاعلات اندماج كافية في كل واحدة زمن. وبناءً على درجة حرارة [keV] T البلازما فإنه يجب أن يتحقق معيار Lawson الذي ينص على أن جداء كثافة البلازما n_i (عدد الجسيمات $[1/\text{m}^3]$) يزمن حصر الطاقة t_E [s] هو كما يلي:

$$n_i t_E \geq 2 \times 10^{20} \text{ s/m}^3 \quad \text{عند } T \geq 10 \text{ keV} \quad (32.14)$$

الإحاطة بالبلازما (حصر البلازما) في مفاعل الاندماج

هناك طريقتان للإحاطة بالبلازما:

— الإحاطة المغناطيسية

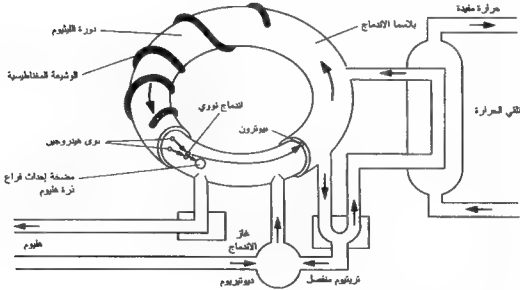
١٣.١٤ الإحاطة بواسطة المعطالة.

يُستخدم في مفاعل الاندماج مع إحاطة البلازما بالحقل المغناطيسي كما هو الحال في مشروع Tokamak (الشكل 13.14) الحقل المغناطيسي لمغناطيسات كهربائية عالية الشدة لإبقاء البلازما في وعاء مفرغ وتحريكها على طول خطوط الحقل المغناطيسي. يُصنع المفاعل بشكل دائري (Torus)، وتتوضع ملفات المغناطيسات الكهربائية حوله، ويقوم المفاعل الدائري بدور الملفات الثانوية للمحولة. وهنا يتحرض تيار يقوم بتسخين البلازما إلى درجة الحرارة 10^8 K. يُغلق الحقل المغناطيسي البلازما ويؤمن لها وقود الاندماج الحراري، ويمنع تلامس البلازما مع اجزاء المفاعل ومبرده. للوعاء المُفرغ غلاف داخلي من الليثيوم (الدثار)، حيث تستولد (تقلس) نيوترونات التريتيوم كما يلي:

(33.14)



يلعب الليثيوم الثقيل ${}^6\text{Li}$ دور المادة الحاضنة والمعدّل (المهدئ).



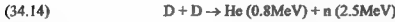
الشكل 13.14 : مبدأ Tokamak.

يتم حجب إشعاعات غاما والنيوترونات عن طريق طبقة خارجية من الرصاص والماء، كما يُخدم الدثار كمصدر حراري لمفاعل Tokamak. تنقل حرارة الاندماج بواسطة ليثيوم ساخن

(1000°C) مع وسيط تبريد (ليثيوم سائل، ماء أو هليوم) إلى مولد البخار لاستخدامها في العملية البخارية.

إن تحقيق موازنة حرارية بخارية إيجابية للاندماج الحراري المضبوط يشترط توفر قيمة عالية لـ η_E (قارن المعادلة 32.14). ومن أجل كثافة غطية للبلازما تبلغ $10^{21}/m^3$ في مفاعل Tokamak يجب أن تكون قيمة $t_E = 25$ عند درجة حرارة للبلازما قدرها 10^8 K. إلا أنه لم يتم الوصول بعد في منشآت إجراء البحث إلى هذه القيم، وإنما تم الوصول إلى درجة حرارة التهاب تبلغ حوالي 10^8 K عند الكثافة المطلوبة تقريباً للبلازما وإلى زمن الحصر 0.1 s، وبالتالي فإن تحقيق الاندماج الحراري المضبوط مع موازنة حرارية موجبة لم يتم بعد.

في غاز الديوتريوم المتأين بشكل كامل يمكن أن تجري تفاعلات الاندماج التالية:



وتتطلب هذه التفاعلات حرارة التهاب أعلى بكثير (حوالي 10^9 K) من تفاعل D-T (انظر الجدول).

الجدول 2.14: درجات الحرارة التصميمية لمفاعل الاندماج المخطط له NETH.

المواصفات	القيم
استطاعة الاندماج الحراري MW	800
نصف قطر البلازما الكبير/الصغير، m	2.05/6.3
شدة الحقل الحلقي على المحور، T	6
تيار البلازما، MA	25-30
إجهاد الجدار بالنيوترنات، MW/m ²	0.7

في المفاعل ذي الإحاطة (الحصر) بواسطة العطالة (المقصود إحاطة البلازما) يتم اللجوء إلى كثافة أعلى للحسيمات تبلغ 10 keV، وهنا لا يلزم حقل مغناطيسي مغلق. تؤمن طاقة التسخين عن طريق ليزر ومُطلق للشوارد. كما تُطلق كريات زجاج متجمد يبلغ قطرها عدة ملليمترات مملوءة بمزيج من D-T عن طريق ليزر كبير جداً مع قطب إشعاع (لفترة 10^{-9} s) ويجري هذا من كل الجوانب. وهكذا ينشأ في الكريات تركيز الطاقة اللازم لبدء الاندماج النووي. تنضغط البلازما

المتشكلة بسرعة كبيرة والمسخنة والموجودة في الطبقة الخارجية وتقوم بتأين خليط D-T داخل الكرة الصغيرة.

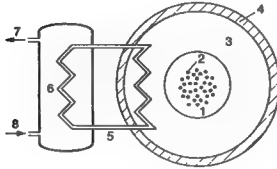
يحدث الاندماج النووي في حجرة مفاعل شكلها حلقي، ويتم نقل الحرارة المنطلقة بواسطة غلاف الليثيوم إلى الماء.

يتم تطوير هذه الطريقة بالدرجة الأولى عدم توفر الليزر ذي الاستطاعة العالية.

يتم العمل الآن في إطار الاتحاد الأوروبي وضع برنامج بحث استراتيجي (Next European NET Tours) هدفه تطوير مفاعل اندماج، ويبيّن الجدول (2.14) درجة الحرارة التصميمية لمفاعل الاندماج المخطط لبنائه NET II.

وعلى طريق تحقيق هذا المشروع هناك عقبات كبيرة أهمها الاجهاد الشديد للمواد وخاصة في الأجزاء الداخلية للمفاعل.

يبين الشكل (14.14) مخطط منشأة مستقبلية لتوليد الطاقة مع مفاعل انصهار وعنفات مع مولدات، ومادة التشغيل هي بخار البوتاسيوم أو بخار الماء. ويُؤمل بأن تصبح طاقة الاندماج النووي في المستقبل نوع الطاقة الذي لا ينضب.



- 1 مفاعل الاندماج
- 2 أنبوب (خرطوم) للبلازما
- 3 ممتص للحرارة
- 4 مادة الهيكل
- 5 دورة وسيط للتبريد
- 6 مولد بخار
- 7 بخار إلى العنفة
- 8 ماء التغذية

الشكل 14.14 : مبدأ مفاعل اندماجي ذي غلاف مغناطيسي.

الملاحق

بعض الجداول والأشكال

- الجدول A.1 - الأجزاء والأضعاف السابقة للوحدات ورموزها
- الجدول A.2 - وحدات الطاقة والاستطاعة
- الجدول A.3 - عوامل التحويل لوحدات الطاقة
- الجدول A.4 - وحدات الضغط ودرجة الحرارة
- الجدول A.5 - عوامل الحالة الترموديناميكية للماء وبخار الماء في حالة الإشباع
- الجدول A.6 - عوامل الحالة للماء في الغليان ولبخار الماء المشبع
- الجدول A.7 - الانتالي النوعي $[kJ/kg]$ للماء وللبخار الحار
- الجدول A.8 - الانتالي النوعي للماء في مجال ما دون الغليان
- الجدول A.9 - الحجم النوعي $[m^3/kg]$ للماء ولبخار الماء
- الجدول A.10 - السعة الحرارية النوعية الوسطية c_p بثبوت الضغط للغازات المثالية $[kJ/kg K]$ c_p
- الجدول A.11 - القيم الحرارية لخواص الطاقة
- الجدول A.12 - السعة الحرارية النوعية c_p للهواء عند الضغوط من 1 حتى $[kJ/kg K]$ 300 bar
- الجدول A.13 - القيم المميزة للهواء الجاف عند bar 1.013
- الجدول A.14 - القيم المميزة للماء عند bar 0.981 أو عند ضغط الإشباع
- الشكل A.1 - مخطط $h-s$ لبخار الماء

الجدول A.1 الأجزاء والأضعاف ورموزها

جزء من المليون	$10^{-6} =$	$\mu =$	ميكرو
جزء من الألف	$10^{-3} =$	$m =$	ميلي
ألف ضعف	$10^3 =$	$k =$	كيلو
مليون ضعف	$10^6 =$	$M =$	ميغا
مليار ضعف	$10^9 =$	$G =$	جيجا
بليون ضعف	$10^{12} =$	$T =$	ترا
بيليارد ضعف	$10^{15} =$	$P =$	بيتا
تريليون ضعف	$10^{18} =$	$E =$	إكسا

الجدول A.2 وحدات الطاقة والاستطاعة

للمطاقة، العمل، كمية الحرارة	[J]	جول
للاستطاعة، تدفق الطاقة (جول الطاقة)، التدفق الحراري	[W]	واط
1 جول = نيوتن متر (Nm) = 1 واط ثانية (Ws)	[J]	1 جول
3600 KJ =		1 kWh
وحدة الحرارة البريطانية = 1.05504 kJ		1 BTU

الجدول A.3 عوامل التحويل لواحدات الطاقة

m^3 غاز طبيعي	Kg ROE	*Kg HCE	kWh	Kcal	kJ	
0.000032	0.000024	0.000034	0.000278	0.2388	-	كيلو جول (kJ)
0.00013	1.0001	0.000143	0.001163	-	4.1868	كيلو كالوري (kcal)
0.113	0.086	1.123	-	860	3600	كيلو واط ساعي [kWh]
0.923	0.7	-	8.14	7000	29308	الواحدة للكفاءة لـ 1kg فحم حجري [HCE]
1.319	-	1.486	11.63	10000	41868	الواحدة للكفاءة لـ 1kg نفط خام (ROE)
-	0.758	1.083	8.816	7580	31736	1 متر مكعب من الغاز الطبيعي
Hard Coal Equivalent = HCE *						
Row Oil Equivalent = ROE**						

الجدول A.4 وحدات الضغط ودرجات الحرارة

1 Pa = 1 N/m ²
1 bar = 10 ⁵ Pa = 0.1 MPa = 750 mm Hg = 1.02 · 10 ⁴ mm H ₂ O
T [K] = t [°C] + 273.15
t [°C] = (t [°F] - 32) / 1.8
T [°R] = t [°F] + 459.67
T [K] = 1.8 T [°R]
الشروط القياسية: الدرجة 0 °C والضغط 1.013

الجدول A.5 عوامل الحالة الترموديناميكية للماء وبخار الماء في حالة الإشباع

p	T	v'	v''	h'	h''	Δh_g	s'	s''
bar	°C	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg · K)	kJ/(kg · K)
0,010	6,9808	1,0001	129,20	29,34	2514,4	2485,0	0,1060	8,9767
0,015	13,036	1,0006	87,98	54,71	2525,5	2470,7	0,1957	8,8288
0,020	17,513	1,0012	67,01	73,46	2533,6	2460,2	0,2607	8,7246
0,025	21,096	1,0020	54,26	88,45	2540,2	2451,7	0,3119	8,6440
0,030	24,100	1,0027	45,67	101,00	2545,6	2444,6	0,3544	8,5785
0,035	26,694	1,0033	39,48	111,85	2550,4	2438,5	0,3907	8,5232
0,040	28,983	1,0040	34,80	121,41	2554,5	2433,1	0,4225	8,4755
0,045	31,035	1,0046	31,14	129,99	2558,2	2428,2	0,4507	8,4335
0,050	32,898	1,0052	28,19	137,77	2561,6	2423,8	0,4763	8,3960
0,055	34,605	1,0058	25,77	144,91	2564,7	2419,8	0,4995	8,3621
0,060	36,183	1,0064	23,74	151,50	2567,5	2416,0	0,5209	8,3312
0,065	37,651	1,0069	22,02	157,64	2570,2	2412,5	0,5407	8,3029
0,070	39,025	1,0074	20,53	163,38	2572,6	2409,2	0,5591	8,2767
0,075	40,316	1,0079	19,24	168,77	2574,9	2406,2	0,5763	8,2523
0,080	41,534	1,0084	18,10	173,86	2577,1	2403,2	0,5925	8,2296
0,085	42,689	1,0089	17,10	178,69	2579,2	2400,5	0,6079	8,0872
0,090	43,787	1,0094	16,20	183,28	2581,1	2397,9	0,6224	8,1881
0,095	44,833	1,0098	15,40	187,65	2583,0	2395,3	0,6361	8,1691
0,10	45,833	1,0102	14,67	191,83	2584,8	2392,9	0,6493	8,1511
0,12	49,446	1,0119	12,36	206,94	2591,2	2384,3	0,6963	8,0872
0,14	52,574	1,0133	10,69	220,02	2596,7	2376,7	0,7367	8,0334
0,16	55,341	1,0147	9,433	231,59	2601,6	2370,0	0,7721	7,9869
0,18	57,826	1,0160	8,445	241,99	2605,9	2363,9	0,8036	7,9460
0,20	60,086	1,0172	7,650	251,45	2609,9	2358,4	0,8321	7,9094
0,25	64,992	1,0199	6,204	271,99	2618,3	2346,4	0,8932	7,8323
0,30	69,124	1,0223	5,229	289,30	2625,4	2336,1	0,9441	7,7695
0,40	75,886	1,0265	3,993	317,65	2636,9	2319,2	1,0261	7,6709
0,45	78,743	1,0284	3,576	329,64	2641,7	2312,0	1,0603	7,6307
0,50	81,345	1,0301	3,240	340,56	2646,0	2305,4	1,0912	7,5947
0,55	83,737	1,0317	2,964	350,61	2649,9	2299,3	1,1194	7,5623
0,60	85,954	1,0333	2,732	359,93	2653,6	2293,6	1,1454	7,5327
0,65	88,021	1,0347	2,535	368,62	2656,9	2288,3	1,1696	7,5055
0,70	89,959	1,0361	2,365	376,77	2660,1	2283,3	1,1921	7,4804
0,75	91,785	1,0375	2,217	384,45	2663,0	2278,6	1,2131	7,4570
0,80	93,512	1,0387	2,087	391,72	2665,8	2274,0	1,2330	7,4352
0,85	95,152	1,0400	1,972	398,63	2668,4	2269,8	1,2518	7,4147
0,90	96,713	1,0412	1,869	405,21	2670,9	2265,6	1,2696	7,3954
1,0	99,632	1,0434	1,694	417,51	2675,4	2257,9	1,3027	7,3598
1,5	111,37	1,0530	1,159	467,13	2693,4	2226,2	1,4336	7,2234
2,0	120,23	1,0608	0,8854	504,70	2706,3	2201,6	1,5301	7,1268
2,5	127,43	1,0675	0,7184	535,34	2716,4	2181,0	1,6071	7,0520
3,0	133,54	1,0735	0,6056	561,43	2724,7	2163,2	1,6716	6,9909
3,5	138,87	1,0789	0,5240	584,27	2731,6	2147,4	1,7273	6,9392
4,0	143,62	1,0839	0,4622	604,67	2737,6	2133,0	1,7764	6,8943
4,5	147,92	1,0885	0,4138	623,16	2742,9	2119,7	1,8204	6,8547
5,0	151,84	1,0928	0,3747	640,12	2747,5	2107,4	1,8604	6,8192
6,0	158,84	1,1009	0,3155	670,42	2755,5	2085,0	1,9308	6,7575
7,0	164,96	1,1082	0,2727	697,06	2762,0	2064,9	1,9918	6,7052
8,0	170,41	1,1150	0,2403	720,94	2767,5	2046,5	2,0457	6,6596
9,0	175,36	1,1213	0,2148	742,64	2772,1	2029,5	2,0941	6,6192
10,0	179,88	1,1274	0,1943	762,61	2776,2	2013,6	2,1382	6,5828

تمة الجدول A.5

P	T	v'	v''	k'	k''	Δh_p	s'	s''
bar	°C	dm ³ /kg	m ³ /kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kg	kJ/(kg K)	K
11	184,07	1,1331	0,1774	781,13	2779,7	1998,5	2,1786	6,5497
12	187,96	1,1366	0,1632	798,43	2782,7	1984,3	2,2161	6,5194
13	191,61	1,1438	0,1511	814,70	2785,4	1970,7	2,2510	6,4913
14	195,04	1,1489	0,1407	830,08	2787,8	1957,7	2,2837	6,4651
15	198,29	1,1539	0,1317	844,67	2789,9	1945,2	2,3145	6,4406
16	201,37	1,1586	0,1237	858,56	2791,7	1933,2	2,3436	6,4175
17	204,31	1,1633	0,1166	871,84	2793,4	1921,5	2,3713	6,3957
18	207,11	1,1678	0,1103	884,56	2794,8	1910,3	2,3976	6,3751
19	209,80	1,1723	0,1047	896,81	2796,1	1899,3	2,4228	6,3554
20	212,37	1,1766	0,09954	908,59	2797,2	1888,6	2,4469	6,3367
21	214,85	1,1809	0,09489	919,96	2798,2	1878,2	2,4700	6,3187
22	217,24	1,1850	0,09065	930,95	2799,1	1868,1	2,4922	6,3015
23	219,55	1,1892	0,08677	941,60	2799,8	1858,2	2,5136	6,2849
24	221,78	1,1932	0,08320	951,93	2800,4	1848,5	2,5343	6,2690
25	223,94	1,1972	0,07991	961,96	2800,9	1839,0	2,5543	6,2536
26	226,04	1,2011	0,07686	971,72	2801,4	1829,6	2,5736	6,2387
28	230,05	1,2088	0,07139	990,48	2802,0	1811,5	2,6106	6,2104
30	233,84	1,2163	0,06663	1008,4	2802,3	1793,9	2,6455	6,1837
32	237,45	1,2237	0,06244	1025,4	2802,3	1776,9	2,6786	6,1585
34	240,88	1,2310	0,05873	1041,8	2802,1	1760,3	2,7101	6,1344
36	244,16	1,2381	0,05541	1057,6	2801,7	1744,2	2,7401	6,1115
38	247,31	1,2451	0,05244	1072,7	2801,1	1728,4	2,7689	6,0896
40	250,33	1,2521	0,04975	1087,4	2800,3	1712,9	2,7965	6,0685
45	257,41	1,2691	0,04404	1122,1	2797,7	1675,6	2,8612	6,0191
50	263,91	1,2858	0,03943	1154,5	2794,2	1639,7	2,9206	5,9735
55	269,93	1,3023	0,03563	1184,9	2789,9	1605,0	2,9757	5,9309
60	275,55	1,3187	0,03244	1213,7	2785,0	1571,3	3,0273	5,8908
65	280,82	1,3350	0,02972	1241,1	2779,5	1538,4	3,0759	5,8527
70	285,79	1,3513	0,02737	1267,4	2773,5	1506,0	3,1219	5,8162
75	290,50	1,3677	0,02533	1292,7	2766,9	1474,2	3,1657	5,7811
80	294,97	1,3842	0,02353	1317,1	2759,9	1442,8	3,2076	5,7471
85	299,23	1,4009	0,02193	1340,7	2752,5	1411,7	3,2479	5,7141
90	303,31	1,4179	0,02050	1363,7	2744,6	1380,9	3,2867	5,6820
95	307,21	1,4351	0,01921	1386,1	2736,4	1350,2	3,3242	5,6506
100	310,96	1,4526	0,01804	1408,0	2727,7	1319,7	3,3605	5,6198
110	318,05	1,4887	0,01601	1450,6	2709,3	1258,7	3,4304	5,5595
120	324,65	1,5268	0,01428	1491,8	2689,2	1197,4	3,4972	5,5002
130	330,83	1,5672	0,01280	1532,0	2667,0	1135,0	3,5616	5,4408
140	336,64	1,6106	0,01150	1571,6	2642,4	1070,7	3,6242	5,3803
150	342,13	1,6579	0,01034	1611,0	2615,0	1004,0	3,6859	5,3178
160	347,33	1,7103	0,009308	1650,5	2584,9	934,3	3,7471	5,2531
170	352,26	1,7696	0,008371	1691,7	2551,6	859,9	3,8107	5,1855
180	356,96	1,8399	0,007498	1734,8	2513,9	779,1	3,8765	5,1128
190	361,43	1,9260	0,006678	1778,7	2470,6	692,0	3,9429	5,0332
200	365,70	2,0370	0,005877	1826,5	2418,4	591,9	4,0149	4,9412
210	369,78	2,2015	0,005023	1886,3	2347,6	461,3	4,1048	4,8223
220	373,69	2,6714	0,003728	2011,1	2195,6	184,5	4,2947	4,5799
221,2	374,15	3,17	0,00317		2107,4	0		4,4429

الجدول A.6 عوامل الحالة للماء في حالة الغليان ولبخار الماء المشبع؛ قائمة درجات الحرارة (kJ, bar)

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي	الكثافة النوعية	الإنثالبي النوعي	حرارة التبخر	الإنثالبي النوعي
t °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	ρ'' kg/m ³	h' kJ/kg	h'' kJ/kg
0,00	0,006108	0,0010002	206,3	0,004847	-0,04	2501,6
5	0,008718	0,0010000	147,2	0,006795	21,01	2510,7
10	0,012270	0,0010003	106,4	0,009396	41,99	2519,9
15	0,017039	0,0010008	77,98	0,01282	62,94	2529,1
20	0,02337	0,0010017	57,84	0,01729	83,86	2538,2
25	0,03166	0,0010029	43,40	0,02304	104,77	2547,3
30	0,04241	0,0010043	32,93	0,03037	125,66	2556,4
35	0,05622	0,0010060	25,24	0,03961	146,56	2565,4
40	0,07375	0,0010078	19,55	0,05116	167,45	2574,4
45	0,09582	0,0010099	15,28	0,06546	188,35	2583,3
50	0,12335	0,0010121	12,05	0,08302	209,26	2592,2
55	0,15741	0,0010145	9,579	0,1044	230,17	2601,0
60	0,19920	0,0010171	7,679	0,1302	251,09	2609,7
65	0,2501	0,0010199	6,202	0,1612	272,02	2618,4
70	0,3116	0,0010228	5,046	0,1982	292,97	2626,9
75	0,3855	0,0010259	4,134	0,2419	313,94	2635,4
80	0,4736	0,0010292	3,409	0,2933	334,92	2643,8
85	0,5780	0,0010326	2,829	0,3535	355,92	2652,5
90	0,7011	0,0010361	2,361	0,4235	376,94	2660,1
95	0,8453	0,0010399	1,982	0,5045	397,99	2668,1
100	1,0133	0,0010437	1,673	0,5977	419,06	2676,0
105	1,2080	0,0010477	1,419	0,7046	440,17	2683,7
110	1,4327	0,0010519	1,210	0,8265	461,32	2691,3
115	1,6906	0,0010562	1,036	0,9660	482,50	2698,7
120	1,9854	0,0010606	0,8915	1,122	503,72	2706,0
125	2,3210	0,0010652	0,7702	1,298	524,99	2713,0
130	2,7013	0,0010700	0,6681	1,497	546,31	2719,9
135	3,131	0,0010750	0,5818	1,719	567,68	2726,6
140	3,614	0,0010801	0,5085	1,967	589,10	2733,1
145	4,155	0,0010853	0,4460	2,242	610,60	2739,3
150	4,760	0,0010908	0,3924	2,548	632,15	2745,4
155	5,433	0,0010964	0,3464	2,886	653,78	2751,2
160	6,181	0,0011022	0,3068	3,260	675,47	2756,7
165	7,008	0,0011082	0,2724	3,671	697,25	2762,0
170	7,920	0,0011145	0,2426	4,123	719,12	2767,1
175	8,924	0,0011209	0,2165	4,618	741,07	2771,8
180	10,027	0,0011275	0,1938	5,160	763,12	2776,3
185	11,233	0,0011344	0,1739	5,752	785,26	2780,4
190	12,551	0,0011415	0,1563	6,397	807,52	2784,3
195	13,987	0,0011489	0,1408	7,100	829,88	2787,8
						2791,9
						2795,9
						2799,9
						2803,9
						2807,9
						2811,9
						2815,9
						2819,9
						2823,9
						2827,9
						2831,9
						2835,9
						2839,9
						2843,9
						2847,9
						2851,9
						2855,9
						2859,9
						2863,9
						2867,9
						2871,9
						2875,9
						2879,9
						2883,9
						2887,9
						2891,9
						2895,9
						2899,9
						2903,9
						2907,9
						2911,9
						2915,9
						2919,9
						2923,9
						2927,9
						2931,9
						2935,9
						2939,9
						2943,9
						2947,9
						2951,9
						2955,9
						2959,9
						2963,9
						2967,9
						2971,9
						2975,9
						2979,9
						2983,9
						2987,9
						2991,9
						2995,9
						2999,9
						3003,9
						3007,9
						3011,9
						3015,9
						3019,9
						3023,9
						3027,9
						3031,9
						3035,9
						3039,9
						3043,9
						3047,9
						3051,9
						3055,9
						3059,9
						3063,9
						3067,9
						3071,9
						3075,9
						3079,9
						3083,9
						3087,9
						3091,9
						3095,9
						3099,9
						3103,9
						3107,9
						3111,9
						3115,9
						3119,9
						3123,9
						3127,9
						3131,9
						3135,9
						3139,9
						3143,9
						3147,9
						3151,9
						3155,9
						3159,9
						3163,9
						3167,9
						3171,9
						3175,9
						3179,9
						3183,9
						3187,9
						3191,9
						3195,9
						3199,9
						3203,9
						3207,9
						3211,9
						3215,9
						3219,9
						3223,9
						3227,9
						3231,9
						3235,9
						3239,9
						3243,9
						3247,9
						3251,9
						3255,9
						3259,9
						3263,9
						3267,9
						3271,9
						3275,9
						3279,9
						3283,9
						3287,9
						3291,9
						3295,9
						3299,9
						3303,9
						3307,9
						3311,9
						3315,9
						3319,9
						3323,9
						3327,9
						3331,9
						3335,9
						3339,9
						3343,9
						3347,9
						3351,9
						3355,9
						3359,9
						3363,9
						3367,9
						3371,9
						3375,9
						3379,9
						3383,9
						3387,9
						3391,9
						3395,9
						3399,9
						3403,9
						3407,9
						3411,9
						3415,9
						3419,9
						3423,9
						3427,9
						3431,9
						3435,9
						3439,9
						3443,9
						3447,9
						3451,9
						3455,9
						3459,9
						3463,9
						3467,9
						3471,9
						3475,9
						3479,9
						3483,9
						3487,9
						3491,9
						3495,9
						3499,9
						3503,9
						3507,9
						3511,9
						3515,9
						3519,9
						3523,9
						3527,9
						3531,9
						3535,9
						3539,9
						3543,9
						3547,9
						3551,9
						3555,9
						3559,9
						3563,9
						3567,9
						3571,9
						3575,9
						3579,9
						3583,9
						3587,9
						3591,9
						3595,9
						3599,9
						3603,9
						3607,9
						3611,9
						3615,9
						3619,9
						3623,9
						3627,9
						3631,9
						3635,9
						3639,9
						3643,9
						3647,9

تمة الجدول A.6

درجة الحرارة	الضغط	الحجم النوعي		الكثافة النوعية	الإنثالبي النوعي		حرارة التبخر	الإنثالبي النوعي	
t °C	p bar	v' m ³ /kg	v'' m ³ /kg	ρ'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	h' kJ/kg K	h'' kJ/kg K
200	15,549	0,0011565	0,1272	7,864	852,37	2790,9	1938,6	2,3307	6,4278
205	17,243	0,0011644	0,1150	8,694	874,99	2793,8	1918,8	2,3778	6,3906
210	19,077	0,0011726	0,1042	9,593	897,74	2796,2	1898,5	2,4247	6,3539
215	21,060	0,0011811	0,09463	10,57	920,63	2798,3	1877,6	2,4713	6,3176
220	23,198	0,0011900	0,08604	11,62	943,67	2799,9	1856,2	2,5178	6,2817
225	25,501	0,0011992	0,07835	12,76	966,89	2801,2	1834,3	2,5641	6,2461
230	27,976	0,0012087	0,07145	14,00	990,26	2802,0	1811,7	2,6102	6,2107
235	30,632	0,0012187	0,06525	15,33	1013,8	2802,3	1788,5	2,6562	6,1756
240	33,478	0,0012291	0,05965	16,76	1037,2	2802,2	1764,6	2,7020	6,1406
245	36,523	0,0012399	0,05461	18,31	1061,6	2801,6	1740,0	2,7478	6,1057
250	39,776	0,0012513	0,05004	19,99	1085,8	2800,4	1714,6	2,7935	6,0708
255	43,246	0,0012632	0,04590	21,79	1110,2	2798,7	1688,5	2,8392	6,0359
260	46,943	0,0012756	0,04213	23,73	1134,9	2796,4	1661,5	2,8848	6,0010
265	50,877	0,0012887	0,03871	25,83	1159,9	2793,5	1633,6	2,9306	5,9658
270	55,058	0,0013025	0,03559	28,10	1185,2	2789,9	1604,6	2,9763	5,9304
275	59,496	0,0013170	0,03274	30,55	1210,9	2785,5	1574,7	3,0223	5,8947
280	64,202	0,0013324	0,03013	33,19	1236,8	2780,4	1543,6	3,0683	5,8586
285	69,186	0,0013487	0,02773	36,06	1263,2	2774,5	1511,3	3,1146	5,8220
290	74,461	0,0013659	0,02554	39,16	1290,0	2767,6	1477,6	3,1611	5,7848
295	80,037	0,0013844	0,02351	42,53	1317,3	2759,8	1442,6	3,2079	5,7469
300	85,927	0,0014041	0,02165	46,19	1345,0	2751,0	1406,0	3,2552	5,7081
305	92,144	0,0014252	0,01993	50,18	1373,4	2741,1	1367,7	3,3029	5,6685
310	98,700	0,0014480	0,01833	54,54	1402,4	2730,0	1327,6	3,3512	5,6278
315	105,61	0,0014726	0,01686	59,33	1432,1	2717,6	1285,5	3,4002	5,5858
320	112,89	0,0014995	0,01548	64,60	1462,6	2703,7	1241,1	3,4500	5,5423
325	120,56	0,0015289	0,01419	70,45	1494,0	2688,0	1194,0	3,5008	5,4969
330	128,63	0,0015615	0,01299	76,99	1526,5	2670,2	1143,6	3,5528	5,4490
335	137,12	0,0015978	0,01185	84,36	1560,3	2649,7	1089,5	3,6063	5,3979
340	146,05	0,0016387	0,01078	92,76	1595,5	2626,2	1030,7	3,6616	5,3427
345	155,45	0,0016858	0,009763	102,4	1632,5	2598,9	966,4	3,7193	5,2828
350	165,35	0,0017411	0,008799	113,6	1671,9	2567,7	895,7	3,7800	5,2177
355	175,77	0,0018085	0,007859	127,2	1716,6	2530,4	813,8	3,8489	5,1442
360	186,75	0,0018959	0,006940	144,1	1764,2	2485,4	721,3	3,9210	5,0600
365	198,33	0,0020160	0,006012	166,3	1818,0	2428,0	610,0	4,0021	4,9579
370	210,54	0,0022136	0,004973	291,1	1890,2	2342,8	452,6	4,1108	4,8144
374,15	221,20	0,00317	0,00317	315,5		2107,4	0,0		4,4429

المجدول ٧.٦ الانثالبي النوعي [kJ/kg/°C] للماء والبخار الحار

الضغط [bar]	200	250	300	350	400	450	500	600	700	800
1	2875.4	2974.5	3074.5	3175.6	3278.2	3382.4	3488.1	3595.8	3704.8	3823.2
5	2875.5	2961.1	3044.8	3148.1	3247.1	3352.2	3463.3	3580.5	3704.5	3835.9
10	2875.5	2943.0	3027.1	3138.5	3244.4	3350.5	3463.3	3582.7	3707.1	3840.4
15	2791.5	2921.5	3037.6	3147.7	3255.8	3363.7	3472.2	3582.4	3693.3	3815.6
20	852.6	2902.4	3025.0	3138.6	3248.7	3357.8	3467.3	3577.9	3689.2	3801.5
25	852.8	2879.5	3010.4	3128.2	3240.7	3346.7	3451.7	3557.9	3665.1	3774.8
30	853.0	2854.8	2995.1	3117.5	3225.5	3334.6	3446.2	3554.1	3661.0	3771.3
35	853.2	2830.1	2979.0	3106.5	3214.2	3324.0	3430.6	3543.4	3651.9	3762.2
40	853.4	1083.8	2962.0	3095.1	3215.7	3331.2	3445.0	3558.6	3672.8	3788.4
45	853.6	1083.8	2944.2	3083.3	3207.1	3324.4	3439.3	3553.8	3668.6	3781.0
50	853.8	1083.8	2925.5	3071.2	3194.3	3317.5	3433.7	3549.0	3664.5	3779.9
60	854.2	1083.8	2885.0	3045.8	3180.1	3303.5	3422.2	3539.3	3656.2	3761.7
70	854.6	1083.8	2839.4	3018.7	3161.2	3289.1	3410.6	3529.6	3647.9	3755.4
80	855.1	1083.8	2796.8	2989.9	3141.6	3274.3	3398.8	3519.7	3639.5	3741.3
90	855.5	1083.8	2744.5	2959.0	3121.2	3259.2	3386.8	3509.8	3631.1	3730.0
100	855.9	1083.8	2743.4	2925.8	3099.9	3243.6	3374.6	3499.8	3622.7	3722.7
120	856.8	1083.9	1341.2	2849.7	3054.8	3211.4	3349.6	3479.6	3605.7	3734.3
140	857.7	1084.1	1339.2	2754.2	3005.6	3177.4	3323.8	3458.8	3588.5	3724.3
160	858.6	1084.3	1337.4	2620.8	2951.3	3141.6	3297.1	3437.7	3571.0	3714.0
180	859.5	1084.5	1335.7	1659.8	2890.3	3104.0	3269.6	3416.1	3553.4	3704.6
200	860.4	1084.7	1334.3	1647.2	2820.5	3064.3	3241.1	3394.1	3535.5	3695.3
250	862.8	1087.5	1331.1	1625.1	2582.0	2954.3	3165.9	3337.0	3489.9	3771.9
300	865.2	1088.4	1328.7	1610.0	2161.8	2825.6	3085.0	3227.4	3443.0	3739.7
350	867.7	1089.5	1326.8	1598.7	1993.1	2676.4	2998.3	3215.4	3395.1	3707.3
400	870.2	1090.8	1325.4	1589.7	1934.1	2515.6	2906.8	3151.6	3346.4	3674.8
500	875.4	1093.6	1323.7	1576.4	1877.7	2293.2	2748.3	3021.1	3210.2	3625.3
600	880.8	1096.9	1322.2	1567.1	1847.3	2187.1	2570.6	2896.2	3151.6	3547.0
800	891.9	1104.4	1324.7	1555.9	1814.2	2094.1	2397.4	2708.0	2980.3	3433.7

المجلد 8.8 الانتافي النوعي للماء في مجال ما دون الغليان [kg/lc]

درجة الحرارة °C	2	5	10	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360
100	419.1	419.4	419.7	420.5	422.0	423.5	425.0	426.5	428.0	429.5	431.0	432.5	434.0	435.6	437.1	438.6	440.1	441.6	443.2		
120	503.7	503.9	504.3	505.0	506.4	507.8	509.2	510.6	512.1	513.5	514.9	516.3	517.7	519.2	520.6	522.0	523.5	524.9	526.4		
140		589.2	589.5	590.2	591.5	592.8	594.1	595.4	596.7	598.0	599.4	600.7	602.0	603.4	604.7	606.0	607.4	608.7	610.1		
160			675.7	676.3	677.5	678.6	679.8	681.0	682.2	683.4	684.6	685.9	687.1	688.2	689.5	690.8	692.0	693.3	694.6		
180				763.6	764.6	765.1	766.7	767.8	768.8	769.9	771.0	772.0	773.1	774.2	775.3	776.4	777.6	778.7	779.8		
200				852.6	853.4	854.2	855.1	855.9	856.8	857.6	858.6	859.5	860.4	861.4	862.3	863.3	864.2	865.2	866.2		
220					944.1	944.7	945.3	945.9	946.6	947.2	947.9	948.6	949.3	950.0	950.8	951.5	952.3	953.1	953.9		
240						1037.7	1037.9	1038.1	1038.4	1038.7	1039.1	1039.4	1039.8	1040.3	1040.7	1041.2	1041.7	1042.2	1042.8		
260							1134.7	1134.5	1134.2	1134.1	1134.0	1133.9	1133.9	1134.0	1134.0	1134.1	1134.3	1134.5	1134.7		
280								1236.0	1235.0	1234.1	1233.3	1232.6	1232.0	1231.4	1230.5	1229.7	1229.0	1228.7	1228.2		
300									1343.4	1341.2	1339.2	1337.4	1335.7	1334.3	1332.9	1331.7	1330.6	1329.6	1328.7		
320										1460.8	1458.3	1455.4	1452.4	1449.8	1447.7	1446.1	1443.6	1441.6	1439.6		
340											1588.3	1579.7	1572.5	1566.2	1560.8	1555.9	1551.6	1547.7	1543.9		
360												1742.9	1722.0	1707.2	1695.6	1686.1	1678.0	1670.5	1663.5		

الجدول 9. أ. الحسم النوعي للماء وليجار $[m^3/kg]$

الضغط [bar]	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800
1	2.172	2.406	2.639	2.871	3.102	3.334	3.565	3.797	4.028	4.490	4.932
5	0.4250	0.4744	0.5226	0.5701	0.6172	0.6640	0.7108	0.7574	0.8039	0.8968	0.9896
10	0.2059	0.2327	0.2580	0.2824	0.3065	0.3303	0.3540	0.3775	0.4010	0.4477	0.4943
15	0.1324	0.1520	0.1697	0.1865	0.2029	0.2191	0.2350	0.2509	0.2667	0.2980	0.3292
20	0.0011725	0.01114	0.1255	0.1386	0.1511	0.1634	0.1756	0.1876	0.1995	0.2232	0.2467
25	0.0011555	0.00699	0.09893	0.10975	0.12004	0.13004	0.13987	0.14958	0.15921	0.17826	0.19714
30	0.0011550	0.07055	0.08116	0.09053	0.09931	0.10779	0.11608	0.12426	0.13234	0.14832	0.16412
35	0.0011545	0.05869	0.06942	0.07678	0.08449	0.09189	0.09909	0.10617	0.11315	0.12694	0.14054
40	0.0011540	0.0012512	0.05883	0.06645	0.07338	0.07996	0.08634	0.09260	0.09876	0.11090	0.12295
45	0.0011533	0.0012503	0.05134	0.05840	0.06472	0.07068	0.07643	0.08204	0.08757	0.09843	0.10910
50	0.0011530	0.0012494	0.04530	0.05194	0.05779	0.06325	0.06849	0.07360	0.07862	0.08845	0.09809
60	0.0011519	0.0012476	0.03614	0.04222	0.04738	0.05210	0.05659	0.06094	0.06518	0.07348	0.08159
70	0.0011511	0.0012461	0.02946	0.03523	0.03992	0.04413	0.04809	0.05189	0.05559	0.06279	0.06980
80	0.0011501	0.0012443	0.02426	0.02995	0.03431	0.03814	0.04170	0.04510	0.04839	0.05477	0.06096
90	0.0011491	0.0012426	0.0014030	0.02579	0.02993	0.03348	0.03674	0.03982	0.04280	0.04853	0.05408
100	0.0011482	0.0012409	0.0013987	0.02242	0.02641	0.02974	0.03276	0.03560	0.03832	0.04355	0.04858
120	0.0011463	0.0012376	0.0013904	0.01721	0.02108	0.02412	0.02679	0.02926	0.03160	0.03607	0.04033
140	0.0011444	0.0012344	0.0013827	0.01321	0.01723	0.02008	0.02251	0.02472	0.02680	0.03072	0.03444
160	0.0011426	0.0012312	0.0013754	0.009784	0.01427	0.01703	0.01929	0.02132	0.02320	0.02672	0.03002
180	0.0011408	0.0012283	0.0013685	0.007122	0.01191	0.01464	0.01678	0.01867	0.02040	0.02360	0.02659
200	0.0011390	0.0012253	0.0013619	0.005728	0.009947	0.01271	0.01477	0.01655	0.01816	0.02111	0.02385
250	0.0011343	0.0012175	0.0013453	0.003600	0.006014	0.009171	0.01113	0.01272	0.01413	0.01663	0.01891
300	0.0011301	0.0012107	0.0013316	0.002540	0.004635	0.007335	0.009681	0.01207	0.01444	0.01736	0.01962
350	0.0011260	0.0012042	0.0013191	0.0015186	0.002111	0.004956	0.006925	0.009342	0.009519	0.01132	0.01327
400	0.0011220	0.0011981	0.0013077	0.0014996	0.001909	0.003675	0.005616	0.006982	0.008088	0.009930	0.01152
500	0.0011444	0.0011866	0.0012874	0.0014438	0.001729	0.002492	0.003882	0.005113	0.006111	0.007720	0.009076
600	0.0011073	0.0011761	0.0012698	0.0014083	0.001632	0.002084	0.002952	0.003947	0.004835	0.006369	0.007460
800	0.0010941	0.0012573	0.0012401	0.0013547	0.001518	0.001772	0.002188	0.002764	0.003379	0.004519	0.005481

الجدول A.10 السعة الحرارية النوعية الوسطية بنبوت الضغط للغازات المثالية c_p [kJ/kgK]

T [°C]	Air	N ₂	N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
-60	1.0030	1.0003	1.0392	0.9123	0.7831	1.8549	0.5915
-40	1.0032	1.0304	1.0392	0.9130	0.7943	1.8561	0.5971
20	1.0034	1.0304	1.0393	0.9136	0.8055	1.8574	0.6026
0	1.0037	1.0305	1.0394	0.9148	0.8165	1.8591	0.6083
20	1.0041	1.0306	1.0395	0.9160	0.8273	1.8611	0.6139
40	1.0046	1.0308	1.0396	0.9175	0.8378	1.8634	0.6196
60	1.0051	1.0310	1.0398	0.9191	0.8481	1.8660	0.6252
80	1.0057	1.0313	1.0401	0.9210	0.8580	1.8690	0.6309
100	1.0065	1.0316	1.0404	0.9230	0.8677	1.8724	0.6365
120	1.0073	1.0320	1.0408	0.9252	0.8771	1.8760	0.6420
140	1.0082	1.0325	1.0413	0.9276	0.8863	1.8799	0.6475
160	1.0093	1.0331	1.0419	0.9301	0.8952	1.8841	0.6529
180	1.0104	1.0338	1.0426	0.9327	0.9038	1.8885	0.6582
200	1.0117	1.0346	1.0434	0.9355	0.9122	1.8931	0.6634
250	1.0152	1.0370	1.0459	0.9426	0.9322	1.9054	0.6759
300	1.0192	1.0401	1.0490	0.9500	0.9509	1.9185	0.6877
350	1.0237	1.0437	1.0526	0.9575	0.9685	1.9323	0.6987
400	1.0286	1.0477	1.0568	0.9649	0.9850	1.9467	0.7090
450	1.0337	1.0522	1.0613	0.9722	1.0005	1.9615	0.7185
500	1.0389	1.0569	1.0661	0.9792	1.0152	1.9767	0.7274
550	1.0443	1.0619	1.0712	0.9860	1.0291	1.9923	0.7356
600	1.0498	1.0670	1.0764	0.9925	1.0422	2.0082	0.7433
650	1.0552	1.0722	1.0816	0.9988	1.0546	2.0244	0.7505
700	1.0606	1.0775	1.0870	1.0047	1.0664	2.0408	0.7571
750	1.0660	1.0827	1.0923	1.0104	1.0775	2.0574	0.7633
800	1.0712	1.0879	1.0976	1.0158	1.0881	2.0741	0.7692
850	1.0764	1.0930	1.1028	1.0209	1.0981	2.0909	0.7746
900	1.0814	1.0981	1.1079	1.0258	1.1076	2.1077	0.7797
950	1.0863	1.1030	1.1130	1.0305	1.1167	2.1246	0.7846
1000	1.0910	1.1079	1.1179	1.0350	1.1253	2.1414	0.7891
1050	1.0956	1.1126	1.1227	1.0393	1.1335	2.1582	0.7934
1100	1.1001	1.1172	1.1274	1.0434	1.1414	2.1749	0.7974
1150	1.1045	1.1217	1.1319	1.0474	1.1489	2.1914	0.8013
1200	1.1087	1.1260	1.1363	1.0512	1.1560	2.2078	0.8049
1250	1.1128	1.1302	1.1406	1.0548	1.1628	2.2240	0.8084
1300	1.1168	1.1343	1.1448	1.0584	1.1693	2.2400	0.8117
1400	1.1243	1.1422	1.1528	1.0651	1.1816	2.2714	0.8178
1500	1.1315	1.1495	1.1602	1.0715	1.1928	2.3017	0.8234
1600	1.1382	1.1564	1.1673	1.0775	1.2032	2.3311	0.8286
1700	1.1445	1.1629	1.1739	1.0833	1.2128	2.3594	0.8333
1800	1.1505	1.1690	1.1801	1.0888	1.2217	2.3866	0.8377
1900	1.1561	1.1748	1.1859	1.0941	1.2300	2.4127	0.8419
2000	1.1615	1.1802	1.1914	1.0993	1.2377	2.4379	0.8457
2100	1.1666	1.1853	1.1966	1.1043	1.2449	2.4620	0.8493
2200	1.1714	1.1901	1.2015	1.1092	1.2517	2.4851	0.8527

الجدول A.11 القيم الحرارية لحوامل الطاقة

حامل الطاقة	الواحدة	القيمة الحرارية لـ 1 kg	عامل HCU*
الفحم الحجري	kg	29 809	1 017
فحم الكوك المستخرج من الفحم الحجري	kg	28 650	0.978
قوالب الفحم الحجري	kg	31 401	1.071
الفحم البني	kg	8 303	0.283
قوالب الفحم البني	kg	19 259	0.657
الفحم البني القاسي	kg	14 980	0.511
حشب الإحراق ($1 \text{ m}^3 = 0.7 \text{ t}$)	kg	14 654	0.500
فحم المستحقات القابل للإحراق	kg	14 235	0.486
الوحد الناتج عن معالجة مياه المجاري	kg	8 499	0.290
النفط الخام	kg	42 622	1 454
بنزين المحركات، بترول المحركات	kg	43 543	1.486
البنزين الخام	kg	43 543	1.486
وقود الطائرات، الوقود الخفيف للمصنعات العمارة على الطائرات	kg	43 543	1.486
الوقود الثقيل للمستعمل للمصنعات العمارة على الطائرات، النفط	kg	42 702	1.457
وقود الديزل (للازوت)	kg	42 702	1.457
وقود التدفئة الخفيف	kg	42 702	1.457
وقود التدفئة الثقيل	kg	41 031	1.400
الكوك المستخرج من النفط	kg	29 308	1.000
الغاز المنحصر	kg	45 887	1.566
غاز مصافي النفطية	kg	48 358	1 650
غاز التحويل إلى فحم كوك (غاز التكويك) غاز للمبنة	m ³	15 994	0.546
غاز الأفران العالية	m ³	4 187	0.143
الغاز الطبيعي	m ³	31 736	1.083
غاز النفط الخام (الغاز المرافق)	m ³	40 300	1.375
الغاز الذي يتواجد غالباً في جبال الفحم الحجري (ميثان)	m ³	15 994	0.546
الغاز الناتج عن معالجة مياه المجاري	m ³	15 994	0.546
النفط الخام	kg	39 565	1.350
القطران الخام	kg	37 681	1.286
الفار (الزفت)	kg	37 681	1.286
المحوم الهيدروجينية الأخرى	kg	38 520	1.314
للتبخرات الأخرى من الزيت المعدنية	kg	38 937	1.329

* المقصود بـ HCU واحدة الفحم الحجري الذي قيمته الحرارية 29300 kg/kg (Hard Coal Unit)

عامل HCF = القيمة الحرارية للوقود / 29300 (Hard Coal Factor)

الجدول A.12 السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للهواء عند الضغط من 1 حتى 300 bar بالـ [kg/kgK]

300	200	150	100	50	25	1	P [bar]
1.4087	1.3612	1.3022	1.2156	1.1116	1.0579	1.0065	$t = 0^\circ\text{C}$
1.2816	1.2288	1.1866	1.1335	1.0720	1.0395	1.0080	50°C
1.2045	1.1614	1.1316	1.0959	1.0549	1.0330	1.0117	100°C

الجدول A.13 القيم المميزة للهواء الجاف عند 1.013 bar

t	c_p	λ	$10^3 \cdot \eta$	$10^6 \cdot \nu$	$10^6 \cdot \alpha$	Pr
$^\circ\text{C}$	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	m^2/s	m^2/s	—
-150	1,026	0,0120	0,870	3,11	4,19	0,74
-100	1,009	0,0165	1,18	5,96	8,28	0,72
-50	1,005	0,0206	1,47	9,55	13,4	0,715
0	1,005	0,0243	1,72	13,30	18,7	0,711
20	1,005	0,0257	1,82	15,11	21,4	0,713
40	1,009	0,0271	1,91	16,97	23,9	0,711
60	1,009	0,0285	2,00	18,90	26,7	0,709
80	1,009	0,0299	2,10	20,94	29,6	0,708
100	1,013	0,0314	2,18	23,08	32,8	0,704
120	1,013	0,0328	2,27	25,23	36,1	0,70
140	1,013	0,0343	2,35	27,55	39,7	0,694
160	1,017	0,0358	2,43	29,85	43,0	0,693
180	1,022	0,0372	2,51	32,29	46,7	0,69
200	1,026	0,0386	2,58	34,63	50,5	0,685
250	1,034	0,0421	2,78	41,17	60,3	0,68
300	1,047	0,0454	2,95	47,85	70,3	0,68
350	1,055	0,0485	3,12	55,05	81,1	0,68
400	1,068	0,0516	3,28	62,53	91,9	0,68
450	1,080	0,0543	3,44	70,54	103,1	0,685
500	1,093	0,0570	3,58	78,48	114,2	0,69
600	1,114	0,0621	3,86	95,57	138,2	0,69
700	1,135	0,0667	4,12	113,7	162,2	0,70
800	1,156	0,0706	4,37	132,8	185,8	0,715
900	1,172	0,0741	4,59	152,5	210	0,725
1000	1,185	0,0770	4,80	173	235	0,735

t درجة الحرارة
 c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط
 λ معامل التوصيل الحراري
 η اللزوجة الديناميكية (اللزوجة)
 ν اللزوجة الحركية
 α معامل نفوذ الحرارة
 Pr رقم براندل

الجدول A.14 القيم المميزة للماء عند 0.981 bar أو عند ضغط الإشباع

t	p	ρ	c_p	λ	$10^3 \cdot \beta$	$10^3 \cdot \eta$	$10^6 \cdot \nu$	$10^6 \cdot \alpha$	Pr
$^{\circ}\text{C}$	bar	kg/m^3	$\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)}$	$\text{W/(m} \cdot \text{K)}$	$1/\text{K}$	$\text{kg (m} \cdot \text{s)}$	m^2/s	m^2/s	-
0	0,9807	999,8	4,218	0,552	-0,07	1,792	1,792	0,131	13,67
10		999,7	4,192	0,578	+0,088	1,307	1,307	0,138	9,47
20		998,2	4,182	0,598	0,206	1,002	1,004	0,143	7,01
30		995,7	4,178	0,614	0,303	0,797	0,801	0,148	5,43
40		992,2	4,178	0,628	0,385	0,653	0,658	0,151	4,35
50		988,0	4,181	0,641	0,457	0,548	0,554	0,155	3,57
60		983,2	4,184	0,652	0,523	0,467	0,475	0,158	3,00
70		977,8	4,190	0,661	0,585	0,404	0,413	0,161	2,56
80		971,8	4,196	0,669	0,643	0,355	0,365	0,164	2,23
90		965,3	4,205	0,676	0,698	0,315	0,326	0,166	1,96
100	1,0132	958,4	4,216	0,682	0,752	0,282	0,295	0,169	1,75
120	1,9854	943,1	4,245	0,686	0,860	0,235	0,2485	0,171	1,45
140	3,6136	926,1	4,287	0,684	0,957	0,199	0,215	0,172	1,25
160	6,1804	907,4	4,324	0,682	1,098	0,172	0,1890	0,173	1,09
180	10,027	886,9	4,409	0,676	1,233	0,151	0,1697	0,172	0,98
200	15,550	864,7	4,497	0,666	1,392	0,136	0,1579	0,171	0,92
220	23,202	840,3	4,610	0,653	1,597	0,125	0,1488	0,168	0,88
240	33,480	813,6	4,760	0,636	1,862	0,166	0,1420	0,164	0,87
260	46,491	784,0	4,978	0,612	2,21	0,107	0,1365	0,157	0,87
280	64,191	750,7	5,309	0,581	2,70	0,0944	0,1325	0,145	0,91
300	85,917	712,5	5,86	0,541	3,46	0,0935	0,1298	0,129	1,00
320	112,89	667,0	6,62	0,491	4,60	0,0856	0,1282	0,111	1,15
340	146,08	609,5	8,37	0,430	8,25	0,0775	0,1272	0,0844	1,5
360	186,74	524,5	13,4	0,349		0,0683	0,1306	0,0500	2,6
374,3	221,24	326	∞	0,209	∞	0,0506	0,155	0	∞

t درجة الحرارة

p الضغط

ρ الكثافة النوعية

c_p السعة الحرارية النوعية ضوت الضغط

λ عامل التوصيل الحراري

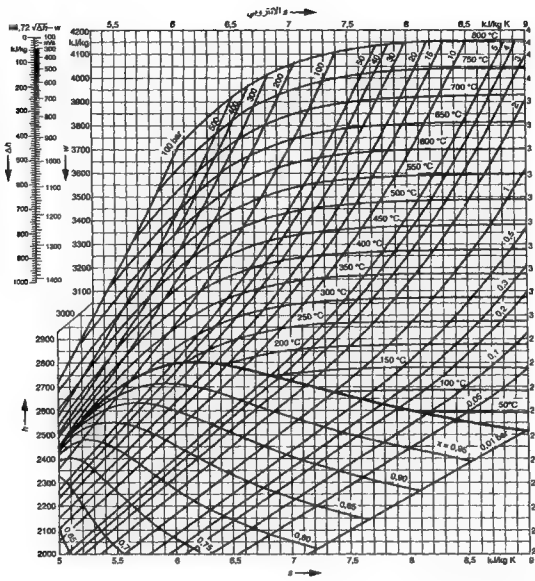
β عامل التمدد الحجمي

η اللزوجة الديناميكية (والمركب)

ν اللزوجة الفيزيائية

α عامل مود الحرارة

Pr رقم برانتل



الشكل A.1: مخطط h-s لبخار الماء

تعريف الرموز

d القطر [m]	A محتوى الوقود من الرماد [kg/kg]
E كثافة تيار الإشعاع [W/m^2]	A المساحة [m^2]
E_k الطاقة الحركية [J]	a نفوذية المائع [m^2/s]
E_p الطاقة الكامنة للموقع [J]	$Ar = g d^3 (p - \rho) / \rho v^2$ رقم أرخميدس
F القوة [N]	B شدة الحقل المغناطيسي [T]
$F = 96487 \text{ C/Mol}$ ثابت فاراداي	b الاستهلاك النوعي للوقود [kg/kWh]
F_R عامل التصريف أو النقل الحراري	C محتوى الوقود من الكربون (الفحم)
للمجمع الشمسي	[kg/kg]
G الطاقة الحرة [J]	C نسبة التركيز للمجمع
g التسارع الأرضي [m/s^2]	C عامل إشعاع الجسم [$W/m^2 K^4$]
$Gr = g l^3 / \nu^2 \beta \Delta T$ رقم غراسهوف	$C_0 = 5.67 \text{ W/m}^2 K^4$ عامل إشعاع الجسم الأسود
H الإنثالبي [J]	C_p قرينة الاستطاعة
H محتوى الوقود من الهيدروجين [kg/kg]	c السعة الحرارية النوعية [J/kg K]
H الارتفاع عن مستوى مرجعي [m]	c_B السعة الحرارية النوعية للوقود [J/kgk]
h الإنثالبي النوعي [J/kg]	c_p السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط
HCL القيمة الحرارية العليا للوقود	[J/kg K]
[J/KG أو m^3]	$c_{p,a}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للهواء
H_{vap} الإنثالبي النوعي للتبخير [J/kg]	[J/m ³ K]
I شدة الإشعاع الإجمالية في المستوى	$c_{p,w}$ السعة الحرارية النوعية بثبوت الضغط للماء
[W/m^2]	[J/kg K]
I شدة التيار الكهربائي [A]	c_v السعة الحرارية النوعية بثبوت الحجم
I_D شدة الإشعاع المباشر في المستوى	[J/kg K]
[W/m^2]	

O محتوى الوقود من الأوكسجين [kg/kg]	I_{Dk} شدة الإشعاع المباشر في مستوى المجموع
O_{min} الاستهلاك الأصغري للأوكسجين	المائل [W/m ²]
اللازم لإحراق الوقود [kg/kg] وقود	I_d شدة الإشعاع المنتشر في المستوى الأفقي
P الاستطاعة [W]	[W/m ²]
P_{el} الاستطاعة الكهربائية لمحطة توليد	I_{dk} شدة الإشعاع المنتشر في مستوى المجموع
الطاقة [W]	المائل [W/m ²]
P_{st} استطاعة العنفة البخارية [W]	I_k شدة الإشعاع الإجمالي في مستوى المجموع
P_{GT} استطاعة العنفة الغازية [W]	المائل [W/m ²]
P_T استطاعة العنفة [W]	I_k تيار القصير [A]
p الضغط [Pa]	k أس الايزنتروبي
p_i الضغط الجزئي لأحد مركبات غازات	k عامل نفوذ الحرارة [W/m ² K]
الاحتراق [Pa]	K_k عامل الضياعات الحرارية الإجمالية
p_{dyn} الضغط الديناميكي [Pa]	للمجموع الشمسي [W/m ² K]
$Pr = \nu/\alpha = \mu c_p/\lambda$ رقم برانتل	L طول الأنبوب [m]
Q كمية الحرارة [J]	l الطول المميز (مثل قطر الأنبوب d) [m]
Q التدفق (التيار) الحراري [J] (تعرف في	LCV القيمة الحرارية الدنيا للوقود m ³ أو J/kg
المراجع غالباً بـ Q)	M عزم الدوران [N m]
Q_G الاستطاعة الحرارية المفيدة لغازات	M الكتلة المولية [kg/k Mol]
الاحتراق [W]	m الكتلة [kg]
Q_R كمية الحرارة المطروحة [J]	m التدفق الكتلي [kg/s] (يشار إليه غالباً
Q_{CC} الاستطاعة الحرارية لحرارة احتراق	في المراجع بـ m)
العنفة الغازية [W]	m_f استهلاك الوقود [kg/s]
Q_k الاستطاعة الحرارية المفيدة للمجموع	mv التدفق الكتلي للبخار الطازج [kg/s]
الشمسي [W]	N محتوى الوقود من الآزوت (النيتروجين)
Q_{CW} الاستطاعة الحرارية المفيدة لماء تبريد	[kg/kg]
المبادل الحراري [W]	n عدد الدورات [min ⁻¹]
Q_0 الاستطاعة الحرارية المفيدة [W]	$Nu = \alpha l / \lambda$ رقم نوسيل

s الانتروبي النوعي [J/kgK]	Q_{AF} الاستطاعة الحرارية للوقود الإضافي الذي يحرق [W]
T درجة الحرارة [K]	Q_s كمية الحرارة المضافة [J]
t درجة الحرارة [°C]	q كثافة التيار الحراري [W/m ²]
t_f درجة حرارة المائع [°C]	q_A التحميل السطحي لحجرة الاحتراق [W/m ²]
t_g درجة حرارة الهواء [°C]	q_R الحرارة النوعية المطروحة [J/kg]
t_{amb} درجة حرارة الوسط المحيط [°C]	q_G التحميل الحراري لمحيط الحراقات (أي لجدران حجرة الاحتراق) [W/m ²]
t_2 درجة حرارة ماء التدفئة العائد [°C]	q_{spec} الاستهلاك الحراري النوعي لمخلة الطاقة [kJ/kWh]
t_{th} درجة حرارة الاحتراق النظرية (الكظيمة) [°C]	q_v التحميل الحجمي لحجرة الاحتراق [W/m ³]
t_s درجة حرارة الإشعاع [°C]	q_s الحرارة النوعية المضافة [J/kg]
t_1 درجة حرارة ماء التدفئة الزاذهب [°C]	R ثابت الغاز [J/kg K]
t_w درجة حرارة الجدار [°C]	R المقاومة الحرارية [m ² K/W]
U التوتر (الجهد، الضغط) [V]	R_i المقاومة الداخلية [Ω]
U_0 توتر العمل بدون حمل [V]	r_{CO} نسبة حجم CO في غازات الاحتراق [m ³ /m ³]
u المركبة المحيطة للسرعة [m/s]	r_{CO_2} نسبة حجم CO ₂ في غازات الاحتراق [m ³ /m ³]
x نسبة البخار في البخار الرطب [kg/kg]	r_{H_2O} نسبة حجم H ₂ O في غازات الاحتراق [m ³ /m ³]
x محتوى الهواء من الرطوبة [kg هواء جاف / kg بخار ماء]	r_i نسبة حجم إحدى مركبات الغاز في غازات الاحتراق [m ³ /m ³]
V الحجم [m ³]	$R_g = Gr Pr = g\beta \Delta T \rho / \nu a$ رقم ريليه [m ³ /m ³]
v الحجم النوعي [m ³ /kg]	R_o رقم ريليه $w / l \nu =$
V_{GS} كمية غازات الاحتراق الناتجة عن إحراق كغ وقود [m ³ /kg]	S الانتروبي [J/K]
V_{CO_2} كمية ثاني أوكسيد الكربون في غازات الاحتراق [kg/m ³]	S محتوى الوقود من الكبريت [kg/kg]
V كمية غازات الاحتراق الرطبة [kg/m ³ وقود]	
V_{dry} كمية غازات الاحتراق الجافة [kg/m ³ وقود]	

β نسبة الضغط	كمية بخار الماء في غازات الاحتراق	V_{H_2O}
β زاوية ميل المجموع الشمسي (درجة)	m^3 بخار ماء / kg وقود]	
(Grad)	كمية الأوزون (التروجين) في غازات	V_{N_2}
β عامل التمدد الحجمي للمائع [1/K]	الاحتراق m^3 من الـ kg / N_2 وقود]	
ΔG تغير الطاقة الحرة	كمية الأوكسجين في غازات الاحتراق	V_{O_2}
Δh هبوط الإنثالي [J/kg]	m^3 من الـ kg / O_2 وقود]	
Δh_f الهبوط الإنثالي للإنتالي في العنفة	كمية ثاني أوكسيد الكبريت في غازات	V_{SO_2}
[J/kg]	الاحتراق m^3 من الـ kg / SO_2 وقود]	
Δp ضياع الضغط [Pa]	العمل [J]	W
Δp_e ضياع الضغط في المقاومات [Pa]	W محتوى الوقود من الماء [kg/kg]	
ΔP_f ضياع الضغط بفعل الاحتكاك [Pa]	عمل التمدد [J]	W_{exp}
ΔT فرق درجات الحرارة [K]	عمل الانضغاط [J]	W_{comp}
ΔT_m فرق درجات الحرارة الوسطي	سرعة الجريان [m/s]	w
اللوغاريتمي [K]	سرعة انجرار الحبيبات (لفرشة الوقود	w_s
ΔU تغير الطاقة الداخلية للجلمة [J]	الدوامية)	
δ ميل الشمس [درجة Grad]	w_{mf} سرعة التسييل (التميع) الدنيا [m/s]	
δ السماكة [m]	w_u العمل النوعي المفيد [J/kg]	
ε درجة الانبعاث	w_p العمل النوعي المستهلك للمضخة	
ε المسامية	[J/kg]	
ε نسبة الانضغاط	w_T العمل النوعي للعنفة [J/kg]	
ε_{off} درجة الإصدار الفعلية	z ارتفاع المقطع للدروس عن مستوي	
η_c درجة تحويل الفحم	مرجعي [m]	
η_{SG} مردود مولد البخار	الرموز اليونانية	
η_{SP} للمردود الحراري للمورة البخار	α درجة الامتصاص	
η_G مردود المولد	α عامل Seebeck [V/K]	
η_{Good} درجة الجودة	α عامل انتقال الحرارة [W/m ² K]	
η_{CO_2} درجة الاستفادة من الطاقة في منشأة	α_c عامل انتقال الحرارة بالحمل [W/m ² K]	
التوليد المشترك للحرارة والكهرباء	α_{Rad} عامل انتقال الحرارة بالإشعاع	
المردود الإجمالي η_{total}	[W/m ² K]	

λ طول الموجة [μm]	المردود الحراري للعتقة الغازية	η_{GT}
μ اللزوجة الحركية للمائع [Pa × s]	المردود الإجمالي للدارة المركبة ذات العتقة الغازية والبخارية معاً	η_{G+S}
ν اللزوجة التحريكية للمائع [m ² /s]	المردود الداخلي للعتقة	η_{it}
ζ نسبة الحرارة لألة تبريد امتصاصية	مردود المجمع	η_k
ξ عامل المقاومة	المردود الإجمالي لمحلة الطاقة	η_{PS}
ρ الكتلة النوعية [kg/m ³]	المردود الميكانيكي للعتقة ومتماتها والمولد	η_m
ρ درجة الانعكاس		
ρ المقاومة النوعية [Ω m]	مردود مولد MHD	η_{MHD}
$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ثابت بولتزمان	المردود البصري للمجمع	η_{opt}
σ الرقم المميز للتيار في محطة التوليد المشترك للكهرباء والحرارة	المردود الحراري لدورة العمل	η_{th}
τ عامل التوصيل (الإرسال)	المردود الحراري لدورة عمل كارنو	$\eta_{th,C}$
τ الزمن [s]	مردود عملية التحويل إلى غاز	η_{Ga}
φ نسبة الحقن	زاوية سقوط الشعاع المباشر على سطح أفقي [Grad]	θ
φ العرض الجغرافي [درجة Grad]	زاوية سقوط الشعاع المباشر على سطح المجمع المائل [درجة Grad]	θ_k
ω سرعة الدوران [s ⁻¹]	عامل زيادة (فائض) الهواء	λ
ω الزاوية الساعية [درجة Grad]	عامل الاحتكاك	λ
ω_s الزاوية الساعية لغياب الشمس	عامل توصيل الحرارة [W/m K]	λ
[Grad]		

تثبيت المراجع

- [1] ADLHOCH, W., BOLT, N.: Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der Kombi-Kraftwerkstechnik. *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 74, Nr. 7, S. 609—612, 1994.
- [2] BECKER, B., FINCKH, H. H.: The 3A-series gas turbines. *Siemens Power Journal*, Aug. 1995, PP. 13—17.
- [3] BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie): *Regenerative Energien*. Bonn, 1992.
- [4] BOHN, T.: *Gasturbinen, Kombi-, Heiz- u. Industriekraftwerke*. Grafelfing: Resch, Verlag, 1992.
- [5] GRASSE, W., MACIAS, M., und SCHIEL, W.: Operating experiences with experimental solar thermal power plants in Spain and perspectives for near-term commercial applications. In: *VDI-Berichte 1024*, Düsseldorf, 1993.
- [6] HAU, E.: *Windkraftanlagen*. Berlin: Springer Verlag, 1988.
- [7] HERBERT, P. K., GI-IL, C. F.: Kombikraftwerke mit integrierter Kohlevergasung — Stand der Technik und Markteinführung. In: *Fortschrittliche Energiewandlung und -anwendung*, VDI-GET-Fachtagung, 24.—25. 3. 1993, Bochum, 1993.
- [8] KALLMEYER, D., ENGELHARD, J.: KoBra-Kombikraftwerk mit integrierter HTW-Braunkohlevergasung. *Brennstoff-Wärme-Kraft*, Bd. 44, 5. 388—391, 1992.
- [9] Karita 360 MWe PFBC will be the first P800. *Modern Power Systems*, Vol. 15, Nr. 2, pp. 33, 35, 1995.
- [10] KEHR, M.: Kraftwerksprojekte der 90er Jahre. *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 74, Nr. 8, S. 705—710, 1994.
- [11] KHARTCHENKO, N. V.: *Thermische Solaranlagen*. Berlin: Springer Verlag, 1995.
- [12] KÖTHE, H. K.: *Stromversorgung mit Solarzellen*. München: Franzis-Verlag, 1991.
- [13] KOOPMANN, E. W.: Erfahrungen mit dem SHELL-Kohlevergasungsprozess.

VGB Kraftwerkstechnik, Bd. 74, Nr. 11, S. 974—977, 1994.

- [14] **KRAUTZ, H.-J., CHALUPNIK, R.:** Braunkohle-Kombi-Kraftwerke mit zirkulierender Druckwirbelschichtfeuerung. *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 74, Nr. 11, S. 1010, 1994.
- [15] **MATARE, H. F., FABER, P.:** Erneuerbare Energien. Düsseldorf: VDI Verlag, 1993.
- [16] **PETZEL, H.-K.:** Die Wirbelschichtfeuerung auf dem Weg zur betriebsgewährten GrolMeuerung? *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 75, Heft 4, S. 380—385, 1995.
- [17] **PEDERSEN, B. M.:** Entwicklung der Windenergietechnologie und ihre Anwendung in Holland und Dänemark. *VDI-Berichte 1024*, S. 85—90, 1993.
- [18] **RAEDER, J., u. a.:** *Kontrollierte Kernfusion*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1981.
- [19] **RECKNAGEL, SPRENGER, SCHRAMEK:** *Taschenbuch für Heizung — Climateclinik*. München: Oldenburg Verlag, 69 ... 96/97. Auflage, 1994/95.
- [20] *Renezvable Energy Sources for Fuels and Electricity*. Exec. editor: L. **BURNHAM**. London: Earthscan Publ., Washington D. C.: Island Press, 1993.
- [21] **SCHULZ, R.:** *Geotliermische Energie*. Köln: C. F. Muller Verlag, 1992.
- [22] **SCHNITZ, K. W., KOCH, C.:** *Kraft-Wiirme-Kopplung*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1995.
- [23] **TAKAHASHI, NAKABAYASHI, FUJITA u. a.:** Aktueller Stand der 350-MW-Wirbelschichtfeuerung Takehara und der 71-MW-Druckwirbelschichtfeuerung Wakamatsu der EPDC sowie der fortschrittlichen Stromerzeugung in Japan. *VGB Kraftwerkstechnik*, Bd. 74, Nr. 11, S. 1003, 1994.
- [24] *VDI-Lexikon Energietechnik*. Hrsg. H. **SCHAEFER** Düsseldorf: VDI Verlag, 1993.
- [25] *VDI-Wärmeatlas*. 6. Aufl., Düsseldorf: VDI Verlag, 1991.
- [26] **WETZEL, R., SCHELLBERG, W.:** Umweltfreundliche Kohlendruckvergasung nach dem PRENELOVerfahren. *Glueckauf Forschungshefte*, Bd. 52, Nr. 3, S. 134—142, 1991.

ملحق أبجدي للمصطلحات الفنية

انكليزي	ألماني	عربي
CO ₂ -Emission from power stations	CO ₂ -Emissionen von Kraftwerken	إطلاق محطات الطاقة لـ CO ₂
Steam power	Dampfleistung	استطاعة البخار
Home consumption in power station	Energiebedarf des Kraftwerkes	الاستهلاك المأاني في محطة توليد الطاقة
Energy reserves	Energiereserven	احتياطيات الطاقة
Energy consumption	Energieverbrauch	استهلاك الطاقة
Energy use	Energierverwendung	استخدام الطاقة
Specific enthalpy	Spezifische Enthalpie	الانثالي النوعي
Entropy	Entropie	الانتروبي
Integration of gasification	Integrierte Vergasung	إدخال عملية تحويل الوقود إلى غاز
Dimensionless numbers	Dimensionslose Kennzahlen	الأرقام اللابعدية للمبيرة
Nuclear fusion	Kernfusion	الاندماج النووي
Combustion of pulverized coal	Kohlenstaubfeuerung	إحراق مسحوق الفحم
Controlled thermonuclear fusion	Kontrollierte thermonukleare fusion	الاندماج الحراري للصبوط
Melting enthalpy	Schmelzenthalpie	انثالي الانصهار
Flue gas recirculation	Rauchgasrückführung	استرجاع غازات الاحتراق
Solar radiation	Sonnenstrahlung	الإشعاع الشمسي
- Diffuse radiation	- Diffusstrahlung	- الإشعاع للثر
- Direct radiation	- Direktstrahlung	- الإشعاع المباشر
- Extraterrestrial	- Extraterrestrische	- إشعاع خارج الأرض
- Global radiation	- Globalstrahlung	- الإشعاع العام
Fundamentals of fluid mechanics	Strömungstechnische Grundlagen	أسس هندسة الموائع

- Fluidized bed	- Wirbelschicht	- الطبقة ذات الحركة الدوامة
Environmental damage	Umweltbelastung	الإضرار بالبيئة
Heat radiation	Wärmestrahlung	الإشعاع الحراري
Heat transfer	Wärmeübertragung	انتقال الحرارة
Wind power	Windleistung	استطاعة الرياح
Combustion	Verbrennung	الاحتراق
- Low emission of harmful substances	- Schadstoffarme	- القليل الإصدار للمواد الضارة
ب		
Vapour, steam	Dampf	البخار
- h-s diagram	- h-s Diagramm	- مخطط h-s للبخار
- State values	- Zustandsgrößen	- القيم المصيرة لحالة البخار
Cooling tower	Kühlturm	برج التبريد
- Dry cooling tower	- Trockenkühlturm	- برج التبريد الجاف
- Wet cooling tower	- Nasskühlturm	- برج التبريد الرطب
ت		
Change of internal energy	Änderung der inneren Energie	تغير الطاقة الداخلية
Design, combustion chamber	Auslegung, Feuerraum	تصميم حجرة الاحتراق
Fuel composition	Brennstoff - Zusammensetzung	تركيب الوقود
Elementary analysis - fuel	Elementaranalyse - Brennstoff	التحليل العنصري للوقود
Energy conversion	Energieumwandlung	تحويل الطاقة
Heating, Furnace	Feuerung	التدفئة ... التسخين
- Environmentally friendly	- Umweltschonende	- الديق بالبيئة
Coal gasification	Kohlevergasung	تحويل الفحم إلى الغاز
Preheating of air, regenerative	Luftvorwärmung, regenerative	التسخين الأولي المتجدد للهواء
Intermediate cooling of air	Luftzwischenkühlung	التبريد الوسطي للهواء
NO - formation	NO- Bildung	تشكل NO
- NO of fuel	- Brennstoff - NO	- NO - الوقود
- Prompt NO	- Promptes NO	- NO - الأني
- Thermal NO	- Thermisches NO	- NO - الحراري
NO _x Reduction	NO _x Minderung	تقليل NO _x
Fluidized bed combustion	Wirbelschichtverbrennung	الاحتراق في موعة الوقود الدوامة

Cross-section load	Querschnittbelastung, Feuerung	التحميل عند التقطع — التسخين
Preheating of feeding water, regenerative	Regenerative Speisewasservorwärmung	التسخين الأولي للتحدد ماء التغذية
Preheating of feeding water	Speisewasservorwärmung	التسخين الأولي ماء التغذية
Heat exchange, radiation	Strahlungsenergieaustausch	تبادل الحرارة بالإشعاع
Thermoelectric power change	Thermoelektrische Energieumwandlung	تحول الطاقة الكهربائي — الحراري
Heat conduction	Wärmeleitung	توصيل الحرارة
		ث
Solar-constant	Solarkonstante	الثابت الشمسي
		ج
Cooling water systems	Kühlwassersysteme	جمل توريد الماء
– Drain-cooling water system	– Ablaufkühlsystem	– ذات الماء الضائع
– Flow-cooling water system	– Durchlaufkühlsystem	– ذات الماء الجاري
– Circulated water cooling	– Kreislaukühlsystem	– ذات إعادة تدوير الماء
Solar module	Solarmodul	الوحدة الشمسية
– MPP-point	– MPP Punkt	– نقطة MPP (الاستطاعة العظمى)
– Peak power	– Spitzenleistung	– استطاعة الذروة
Flow	Strömung	الجريان
Carburettor	Vergaser	جهاز تحويل الوقود إلى غاز
		ح
Biomass	Biomasse	الكتلة الحيوية
Burner	Brenner	المحرق
– Burner-belt-load	– Gürtelbelastung, Feuerung	– تحميل حراري في الحزام المحيط بالحرفات
Combustion chamber	Brennkammer	حجرة الاحتراق
Energy carriers	Energieträger	حوامل الطاقة
Convection	Konvektion	الحمل الحراري (انتقال الحرارة بالحمل)
Specific volume	Spezifisches volumen	الحجم النوعي
		خ
Throttling	Drosselung	الخنق
Fuel cells	Fuelzellen	خلايا الوقود
– Alkaline	– Alkalische	– القلوية
– Solid oxide fuel cell	– Festelektrolyt (SOFC)	– ذات التحليل الكهربائي (SOFC)

Compressed air energy storage	Druckluftspeicher	خزاف الهواء للمصعوط
Energy storage	Energiespeicher	خزاف الطاقة
Latent heat storage medium	LWS-Speichermedium	وسائط تخزف الحرارة الكامنة
Seasonal heat storage	Saisonale wärmespeicher	الخزافات الحرارة الفصلفة
Fly wheel storage	Schwungradspeicher	الخزافات ذات العوالب للمعدل
Storage medium	Speichermedium	وسائط التخزف
Thermo chemical	Thermochemische	الحرارة — الكفمفافة
Water heat storage	Wasserwärmespeicher	الخزافات الحرارة بامستخدام للماء
Preheating mixer	Mischvorwärmer	علاط التسخفن الأولف
Solar cells	Solarzellen	الخلافا الشمسفة
– Si – cell, Monocrystalline	– Si – Zellen, monokristalline	– خلافا السفسفوم أحادفة البلورة
– Si – cell, Polycrystalline	– Si – Zellen, polykristalline	– خلافا السفسفوم للعدة البلورف
د		
Fly wheel	Schwungrad	العوالب للمعدل (الخزافة)
Degree of emission	Emissionsgrad	درجة الإسماع
– Effective	– Effektfver	– درجة الاتبعاا المعطف
Degree of absorption	Absorptionsgrad	درجة الامتصاص
Carton-cycle	Carnot-Kreisprozeß	دورة عمل كارنو
Clausius-Rankine-Cycle	Clausius-Rankine- Kreisprozeß	دورة عمل كلاؤزفوس — رانكفن
Cycle process	Kreisprozeß	دورة العمل
– Diesel	– Diesel	– دورة دفرل
– Joule	– Joule	– دورة جول
– Otto	– Otto	– دورة أوتو (للزفرن)
Degree of reflection	Reflexionsgrad	درجة الانعكاسف
Melting point	Schmelztemperatur	درجة حرارة الانصهار
Adiabatic combustion temperature	Adiabate Verbrennungstemperatur	درجة حرارة الاحتراق الكظفم (الأدبافان)
ر		
Ash	Asche	الرماد
Graßhof-Nr.	Graßhof – Zahl	رقم عرافهوف
Nusselt-Nr.	Nusselt – Zahl	رقم نوسلف
Prandtl-Nr.	Prandtl – Zahl	رقم برانفل

Reynolds-Nr.	Reynolds- Zahl	رقم رينولدز
Rayleigh-Nr.	Rayleigh- Zahl	رقم راييه
Current number	Stromkennzahl	الرقم للممر للتيار
من		
Desulphurization of fl. gases	Entschwefelung der Rauchgase	سحب الكبريت من غازات الاحتراق
- Washing with lime water	- Kalkwaschverfahren	- طريقة الغسيل بمحلول الكلس
- With sulphur generation	- mit Schwefelerzeugung	- مع إنتاج الكبريت
- With generation of gypsum	- mit Gipserzeugung	- مع إنتاج الجص
- Simultaneous	- Simultan	- المتزامن
Denitrification of flue gases	Entstickung der Rauchgase	سحب الأزوت من غازات الاحتراق
Heating surfaces of steam generator	Heizflächen der Dampferzeuger	سطوح التسخين لمولد البخار
- Necessary surface	- erforderliche Fläche	- السطح اللازم
Combined desulphurization and Denitrification	Entschwefelung und Entstickung	السحب المشترك للكبريت والأزوت
Specific heat capacity	Spezifische Wärmekapazität	السعة الحرارية النوعية
Removal of dry slag	Trocken-Schlackeabzug	سحب الحصى الجاف
Water separators	Wasserabscheider	مساحات الماء
من		
Heat loss of flue gases	Abgaswärmeverlust	الصباغات الحرارية مع غازات الاحتراق
Pressure loss (drop)	Druckverlust	صباغ الضغط
- Pressurized fluidized bed	- Druckwirbelschicht (DWS)	- في الطبقة ذات الحركة القوسية للضغط
- Individual resistances	- Einzelwiderstände	- في المقاومات المختلفة
- Moody-Colebrook Diagram	- Moody-Colebrook-Diagramm	- مخطط مودي لصباغ الضغط
- Friction	- Reibung	- بفعل الاحتكاك
- Fluidized bed	- Wirbelschicht	- في الطبقة ذات الحركة القوسية
Heat loss through cooling	Wärmeverlust durch Abkühlung	الصباغ الحراري بفعل التبريد
Heat loss through unburned fuel	Wärmeverlust durch Unverbranntes	الصباغ الحراري بفعل عدم الاحتراق
Heat loss through slag	Wärmeverlust durch Schlackenwärme	الصباغ الحراري مع الحصى
Heat losses of steamgenerator	Wärmeverluste des Dampferzeugers	الصباغات الحرارية لمولد البخار

Alternative energy	Alternative (regenerative) Energie	الطاقة البديلة (المتجددة)
Anergy	Anergic	الطاقة الضائعة
Energy	Energie	الطاقة
- Internal	- Innere	- الداخلية
- Kinetic	- Kinetische	- الحركية
- Potential	- Potentielle	- الكامنة
Hot-dry-rock-method	Hot-dry-rock-Verfahren	طريقة الصخور الجافة الساخنة
Exergy	Exergie	الطاقة المتاحة
Free energy	Freie energie, gibbssche	الطاقة الحرة (طاقة جيبس الحرة)
Regenerative energies	Regenerative energien	الطاقات المتجددة
- Biomass	- Biomasse	- الكتلة الحيوية
- Tidal power	- Gezeitenenergie	- المد والجزر
- Geothermal energy	- Geothermische Energie	- حرارة باطن الأرض
- Hydro power	- Hydroenergie	- طاقة المياه
- Ocean thermal energy	- Meerewärme	- حرارة البحار
- Growing raw materials	- Nachwachsende Rohstoffe	- المواد الخام المتزايدة
- Solar energy	- Sonnenenergie	- الطاقة الشمسية
- Waves energy	- Wellenenergie	- طاقة الأمواج
- Wind energy	- Windenergie	- طاقة الرياح
Fluidized bed	Wirbelschicht	الطبقة الدوامة
Green-house-effect	Treibhauseffekt	ظاهرة البيت الزجاجي
Work	Arbeit	العمل
- Volum change-work	- Volumenänderungsarbeit	- عمل تغير الحجم
- Technical	- Technische	- العمل الهندسي (المحرك)
Steam process	Dampfprozeß	عملية البخار
Steam turbine	Dampfturbine	العمدة البخارية
- Condensing turbine	- Kondensationsturbinen	- عمدة التكثف
- High pressure	- Überdruckturbine	- ذات الضغط العالي

Expansion work	Expansionsarbeit	عمل التمدد
Gas turbines	Gasturbinen	الغضات الغازية
Back pressure turbine	Gegendruck-Dampfturbine	الغضات البخارية ذات الضغط العالي
Joule - process	Joule- Prozess	عملية جول
Excess air factor	Luftüberschusszahl	عامل زيادة (فائض) الهواء
Stoichiometric relations	Stöchiometrische Beziehungen	العلاقات الستوكيومترية
Gasification process	Vergasungsprozess	عملية التحويل إلى غاز
Heat insulation	Wärmeschutz	عزل الحرارة
ف		
Laval nozzle	Laval-Düse	فوهة لانفال
Coal-composition	Kohle—Zusammensetzung	القسم — تركيبه
Cyclon separator	Zyklonabscheider	الماصل الدوار (السيكلوني)
Cyclon furnace	Zyklonfeuerung	الفرن السيكلوني
ق		
High calorific	Brennwert	القيمة الحرارية العليا للوقود
Calorific value	Heizwert	القيمة الحرارية
— Energy carrier	— Energieträger	— حامل الطاقة
— Low	— Unterer	— الدنيا
Properties of substance	Stoffwerte	القيم المميزة لمادة
Nuclear forces	Bindungsenergie, nukleare	قوة الارتباط النووية
Stefan-Boltzman-Law	Stefan-Boltzmannsches Gesetz	قانون شتيفان — بولتزمان
م		
Heat recovery boiler	Abhitzekessel (AMK)	مرجل الحرارة الضائعة
Bernoulli-Equation	Bernoulli-Gleichung	معادلة برنولي
High calorific value-boiler	Brennwertkessel	مرجل الاستفادة من قيمة الحرارة العليا للوقود
Steam generator	Dampferzeuger	مولد البخار
— Benson-boiler	— Benson-Kessel	— مرجل بيسون
— Natural circulation	— Naturumlaufl	— للمولدات ذات الجريان الطبيعي
— Forced circulation	— Zwangumlaufl	— ذو الدوران القسري
— Once through	— Zwangdurchlauf	— ذو الجريان القسري مع الانسياب لمرة واحدة في الدورة

Steam-power station	Dampfkraftwerk	المحطة البخارية لتوليد الكهرباء
DENOX-equipment	DENOX- Anlagen	معدات سحب الآزوت
One-flux-steam generator	Einzug-Dampferzeuger	مولدات البخار ذات احدى الأعمدة للمارات
Combined power and heat generation stations with bleeding and back pressure	Entnahme-Gegendruck-Heizkraftwerk	محطات توليد للبخار للكهرباء والحرارة ذات سحب البخار والضغط للتبادل (الماكس)
Bleeding-condensing power station	Entnahme-Kondensationskraftwerk	محطات الطاقة ذات سحب البخار وتكثيفه
Euler-basic equation	Euler-Hauptgleichung	المعادلة الأساسية لأويلر
Euler-turbine equation	Euler-Turbinengleichung	معادلة أويلر للصفقات
Gas turbine power stations	Gasturbinenanlagen	المستآت ذات الصفقات الغازية
Geothermal power station	Geothermisches Kraftwerk	محطات الطاقة ذات حرارة جوف الأرض
Tidal power station	Gezeitenkraftwerk	محطات الطاقة ذات المد والجزر
Combined cycle power stations	Kombinierte Gas-und Dampf turbinenanlagen	محطات الدارة المركبة
Combined power and heat generation station	Herzkraftwerke	محطات التدفئة وتوليد الكهرباء
Condensers	Kondensatoren	المكثفات
MHD-Generator	MHD-Generator	مولدات MHD
Closed feed water heater	Oberflächen-Speisewasservorwärmer	مسخنات الماء الأولية للتدفئة
PV-plants	Photovoltaik (PV) anlagen	للشآت الكهروضوئية PV (الفوتوفلطية)
- Thin solar cells	- Dünnschicht- Solarzellen	- الخلايا الشمسية الرقيقة
- p/n gate	- p/n Übergang	- المسر من النوع p/n
- Polycrystalline solar cells	- Polykristalline Solarzellen	- الخلايا الشمسية متعددة المرات
- Solar generator	- Solargenerator	- المولد الشمسي
- Solar module	- Solarmodul	- اعمدة الشمسية
- Solar modul, MPP point	- Solarmodul MPP-Punkt	- نقطة الاستطاعة الأعظمية
- Satellite power station,	- Satellitenkraftwerk	للمجموعة الشمسية
- Island system	- Inselssystem	- محطات الطاقة ذات الأقمار الصناعية
- With net connected system	- Netzgebundenes System	- حملة الجزيرة (عبر المتصلة بشبكة الكهرباء الأساسية)
Accumulators	Speicherbatterien	- الحملة للتوصلة بالشبكة المدحرات (البطاريات)

Solar collector	Solarkollektoren	المجمعات الشمسية
Concentrating collector	Konzentrierende Kollektoren	المجمعات المركزة
Parabolic collector	Parabolrinnen Kollektoren	المجمع على شكل قطع مكافئ
Thermal-solar power station	Thermische Solarkraftwerke	محطات توليد الطاقة الحرارية
Thermo electrical generator	Thermoelektrischer Generator	المولد الكهربائي الحراري
- Efficiency	- Wirkungsgrad	- المردود
- Upwind-power station	- Aufwind-Kraftanlage	- ذات تيار الهواء للتصاعد
- Dish-Stirling system	- Dish-Stirling system	- الجملة ذات صحن ستيرلينج
-Efficiency	- Effizienz	- الفعالية
- Heliostate	- Heliostaten	- ذات المرايا العاكسة الدوارة
- Solar farm concept	- Solarfarm-Konzept	- مشروع المزارع الشمسية
- Central receiver	- Zentralreceiver	- المستقبل المركزي
- Solar tower-concept	- Solarfarm-konzept	- مشروع البرج الشمسي
Super heater	Überhitzer	المحمص
Evaporator	Verdampfer	المحمر
Heat pumps	Wärmepumpen	لمضخات الحرارية
Heat exchangers	Wärmeaustauscher	المبادلات الحرارية
Hydro power station (plant)	Wasser Kraftwerke	محطات توليد الطاقة المائية
Wind farm	Windpark	مرعة الرياح
Wind power plant	Windkraftanlage	محطات طاقة الرياح
Thermal efficiency	Wirkungsgrad, thermischer	المردود الحراري
Efficiency	Wirkungsgrad	المردود (الكفاءة)
Internal efficiency	Wirkungsgrad, innerer	المردود الداخلي
Air preheater	Luftvorwärmer	المسخن الأولي للهواء
		هـ
Primary air	Primärluft	الهواء الأولي
Hydrogen	Wasserstoff	الهيدروجين



Bibliotheca Alexandrina



0647517

السعر : 18 دولار أو ما يعادلها